UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE

Energie, matériaux, sciences de la terre et de l'univers (EMSTSU)

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

THÈSE présentée par :

Daniel HUBÉ

soutenue le : **17 décembre 2024**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Sciences de l'environnement et histoire contemporaine

(1914-1918)

Première Guerre mondiale sur le front occidental

L'héritage environnemental d'une guerre et d'une sortie de guerre industrielles

Thèse dirigée par :

BATTAGLIA-BRUNET Fabienne	Chercheur, BRGM Orléans Université d'Orléans

Co-dirigée par :

GRANDHOMME Jean-Noel	Professeur, CRUHL, Université de Lorraine

RAPPORTEURS :

DECOCQ Guillaume	Professeur, Université de Picardie
LALOUX Ludovic	Professeur, Université de Haute-Alsace, **Président du jury**

JURY :

BATTAGLIA-BRUNET Fabienne	Chercheur, BRGM
COCHET François	Professeur émérite, Université de Lorraine
GRANDHOMME Jean-Noel	Professeur, CRUHL, Université de Lorraine
LE FORESTIER Lydie	Maître de conférences, ISTO, Université d'Orléans
STURCHIO Neil	Professeur, université du Delaware, USA.

A mon père, parti malgré lui
A son père, Malgré-nous

A la mémoire de tous les combattants

Mon arrière grand-père maternel durant la Grande Guerre (à gauche)

Remerciements

Je me souviens en tant que jeune garcon des traces visibles laissées par la guerre, la Seconde Guerre mondiale, dans les paysages, sur les facades criblées des maisons ou encore peintes de flèches indiquant la position des caves et abris et dans les récits familiaux. J'ai grandi dans ces envrironnements guerriers imposés par l'histoire et l'écrasante présence des casernements, casemates de la ligne Maginot puis des vols à basse altitude des avions de l'OTAN qui faisaient vibrer les murs du lycée. 1914-1918 était inconnue, lointaine, absente de la mémoire familiale. J'ai souhaité savoir ce que la Première Guerre mondiale nous avait laissée, d'invisible, sous nos pieds. Ce travail de doctotat est le fruit de presque 15 ans de recherches, études, sur les anciens champs de bataille, comme ailleurs, dans ce que furent les usines de guerre. Il fut mené à bien, par ma motivation de faire émerger des réalités et questions inconnues, peut être l'essence même du chercheur et n'aurait jamais été rendu possible sans la contribution de personnes rencontrées durant mon processus de recherche et que je tiens à remercier pleinement.

Je remercie Fabienne Battaglia-Brunet (BRGM) et Jean Noel Grandhomme (CRUHL, université de Lorraine) d'avoir accepté de prendre la co-direction et la responsabilité de ce doctorat, ainsi que l'ensemble des membres du jury, et merci encore à Messieurs Ludovic Laloux (université de Haute-Alsace) et Guillaume Decocq (université de Picardie) d'avoir accepté la lecture du manuscrit au titre de rapporteurs. Qu'elles et ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Eric Schnell, ingénieur principal, chef démineur, centre du déminage de Colmar (Haut-Rhin). Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC). Eric Fixari, artificier, Cardem-Pyro, puis Eddy Facon, Directeur d'études du Pôle Prospective, Maîtrise d'ouvrage & Développement Durable, Service Express Régional Métropolitain de l'Etoile Ferroviaire de Lille (SNCF) et historien passionné des réseaux de chemin de fer de circonstance de 1914-1918.

Puis j'accorde une attention toute particulière à Guillaume Jacquinet, historien de la guerre de mine, en charge de l'étude et de la préservation des vestiges des systèmes souterrains de l'Argonne et de Vauquois, sans les compétences (historiques, archéologiques, spéléologiques) duquel, l'exploration des souterrains, si riches d'enseignements, n'aurait pas été possible. Puis Benjamin Gilles, ayant contribué à la mission nationale du Centenaire et historien de la Grande Guerre et sa compagne Laetitia, alors responsable des bibliothèques départementales de l'Aisne qui m'invita à donner une conférence, l'une de mes première d'une longue liste de dates, mais certainement la plus émouvante, sur le Chemin des Dames (Corbeny en 2016). Je n'oublirai jamais l'appui de mes collègues allemands, Dirk Willig, officier chercheur et historien de la géologie militaire de la *Bundeswehr* pour ses éclairages concernant les tactiques de la guerre de mine ainsi que Tobias Bausinger et le Professeur Johannes Preuss de l'université Johannes Gutenberg de Mayence, pour leur expertise, la mise à disposition de données essentielles et non encore publiées et qu'ils n'eurent pas l'opportunité de le faire.

Je tiens à remercier mon établissement où j'exerce, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et plus particulièrement Clément Zornig et Francis Garrido pour m'avoir ouvert des parenthèses de temps pour réaliser ce travail, mené dans des conditions de charge de travail sur le plan professionnel parfois éprouvantes, et la confiance manifeste et toujours accordée. Puis je ne peux que souligner d'incontournables appuis et soutiens sans failles, amicaux, de Patrick Ollivier, Jennifer Harris et Susanne Schomburgk, jamais avares de leur disponibilité, de leur expertise, leurs conseils de chercheurs expérimentés. Et puis il y a la présence sensible et le soutien chaleureux de Cécile et Aliénor avec qui j'ai pu contribuer à valoriser un autre témoignage, celui d'une civile dans la bataille de Normandie, pour que lui aussi ne tombe pas dans les limbes de l'oubli.

Merci encore à elles et eux.

Liste des sigles et abréviations

ADNT	Amino-dinitrotoluène
AEF	*American Expeditionary Force* (Force expéditionnaire américaine)
ALGP	Artillerie Lourde Grande Puissance
ALVF	Artillerie Lourde sur Voie Ferrée
AM	Alexandre Millerand
AN	Archives Nationales (site de Pierrefitte)
ANS	Acide Nitrique Synthétique
ANFO	*Ammonium Nitrate Fuel Oil*
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ANZAC	*Australian and New Zealand Army Corps* (Corps d'armée de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande)
ARS	Agences Régionales de la Santé
BCA	Bataillon de Chasseurs Alpins
BDIC	Bibliothèque de Documentation Internationale Contemporaine
BEF	*British Expeditionary Force* (Force expéditionnaire britannique)
Bie	Batterie (artillerie)
BIP	*Blown-In-Place* (éclatement sur place)
BNF	Bibliothèque Nationale de France
BOA	Bataillon d'Ouvriers de l'Artillerie
CA	Corps d'Armée
CAEF	Centre des Archives Economiques et Financières
CE	Communauté Européenne
COD	Carbone Organique Dissous
CCR	Commission Centrale de la Récupération (Belgique, 1920)
COT	Carbone Organique Total
CUP	Coefficient d'Utilisation Pratique
DC	« *Clark I* » (chlorure de diphénylarsine)
DCA	Défense Contre Avion
DG	« *Clark II* » (cyanure de diphénylarsine)
DGS	Direction Générale de la Santé
DI	Division d'Infanterie
DANT	Diamino-nitrotoluène
DNB	Dinitrobenzène
DNN	Dinitronaphtalène
DNP	Dinitrophénol
DNT	Dinitrotoluène
DOE	*Department of Energy* (Etats-Unis) (Département de l'énergie)
DoD	*Department of Defense* (Etats-Unis) (Département de la defense)
DOM	*Dissolved Organic Matter* (matière organique dissolute)
DPAA	*Diphenylarsinic acid*
DWEL	Drinking water equivalent level (Etats-Unis) (valeur seuil équivalente eau potable)
EFSA	*European Food Safety Authority* (autorité européenne pour la sureté alimentaire)
EOD	*Explosive Ordnance Disposal* (Etats-Unis) (déminage, service d'élimination d'engins explosifs)

EPA	*Environment Protection Agency* (Etats-Unis) (Agence de protection de l'environnement)
ERGMu	Etablissement de Réserve Générale de Munitions
FGAN	*Fertilizer Grade Ammonium Nitrate (Nitrate d'ammonium de composition d'engrais)*
GA	Groupe d'Armées
GCATA	Général Commandant de l'Artillerie du Territoire d'Alsace
GFW	*Geringfügigkeitsschwellenwerte* (Allemagne) (Valeur seuil de constat d'impact)
GQG	Grand Quartier Général
GQM	*Great Quarter Master*
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HMU	*Hessisches Ministerium für Umwelt* (Allemagne) (Ministère de l'environnement du Land de Hesse)
HMX	*Hight Melting EXplosive* (Grande-Bretagne). Octogène
HOD	*High-Order Detonation* (detonation de haut-ordre)
HWK	Hartmannswillerkopf
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IGN	Institut Géographique National
JMO	Journal de Marche et Opérations
KP	*Potassium perchlorate* (perchlorate de potassium)
LABO	*Landes Arbeits Boden* (Allemagne) Groupe de travail fédéral sur les sols
LAWA	*Landes Arbeits Wasser* (Allemagne) Groupe de travail fédéral sur l'eau
LOD	*Low-Order Detonation* (détonation de bas-ordre)
MA3	*Munitionsanstallt 3* (établissement de munition n°3)
MCB	Monochlorobenzène
MICI	Maladie Inflammatoire Chronique de l'Intestin
MNN	Mono NitroNaphtalène
MTES	Ministère de la Transition Ecologique Solidaire
MTECT	Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion du Territoire
NA	Nitrate d'ammonium
NAC	*Nitro Aromatic Compound* (composés nitroaromatiques)
NAK	*National Archives, Kew Gardens* (Londres)
NAW	*National Archives, Washington D.C.*
NB	NitroBenzène
NC	NitroCellulose
NG	NitroGlycérine
NIGU	Nitroguidinine
NOEC	*Non Observed Effect Concentration* (concentration sans effet observé)
NP	Nitrophénol
NT	Nitrotoluène
OB	*Open Burning*
OD	*Open Detonation*
OEHHA	*Office of Environmental Health Hazard Assessment* (bureau pour l'évaluation des risques sanitaires environnementaux)
OMS	Organisation Mondiale pour la Santé
ONU	Organisation des Nations Unies
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord

PA	Perchlorate d'Ammonium
PAPS	Parc d'Artillerie de la Place de Strasbourg
PAR	Parc d'Artillerie Régional
PBDD	PolyBromoDiphénylDioxine
PBDF	PolyBromoDiphénylFuranne
PCDD	PolyChloroDiphénylDioxine
PCDF	PolyChloroDiphénylFuranne
PEP	*Propellants, Explosives and Pyrotechnics* (poudres, explosifs et engins pyrotechniques)
PETN	3-Nitrooxy-2,2-bis(nitrooxymethyl)propyl nitrate), penthrite, nitropenta
PG	Prisonnier de Guerre
RAL	Régiment d'Artillerie Lourde
REG	Restes Explosifs de Guerre
RI	Régiment d'Infanterie
RDX	*Royal Demolition EXplosive* (Grande-Bretagne) 1,3,5-Trinitroperhydro-1,3,5-triazine). Hexogène
SAA	*Small Arms Ammunition*
SERDP	*Strategic Environmental Research and Development Program* (Etats-Unis) (Programme stratégique pour le développement et la recherche environnementale)
SDM	Service de Destruction des Munitions (Belgique, 1920)
SDN	Société Des Nations
SFIO	Section Française de l'Internationale Ouvrière
SGDSN	Secrétariat Général de la Défense et de la Sureté Nationale
SMOW	*Standard Mean Ocean Water*
SNPE	Société Nationale des Poudres et Explosifs
SPLI	Société Lorraine de Produits Industriels
SSLS	Sous-Secrétariat à la Liquidation des Stocks
STE	Service des Travaux de l'Etat
STPU	Service des Travaux de Première Urgence
SYDET	*Sympathetic Detonation* (détonation par sympathie)
TAL	Territoire d'Alsace-Lorraine
TE	Terrain d'Explosion
TNB	Trinitrobenzène
TNN	Trinitronaphtalène
TNT	2,4,6-Trinitrotoluène
TNP	2,4,6-Trinitrophénol
TPI	Tribunal Pénal International
USACHPPM	*US Army Center for Health and Preventive Medicine* (Centre de l'armée des Etats-Unis pour la Santé et la médecine preventive)
UXO	*Unexploded Ordnance* (Etats-Unis) (munition non explosée)
WHO	*World Health Organization* (Organisation Mondiale de la Santé, OMS)
WS	*White Star*
WWI	*World War One* (Première Guerre mondiale)
WWII	*World War Two (*Seconde Guerre mondiale).

Table des matières

Introduction générale & problématique posée 44
1. Emergence 44
2. Environnements de guerre, environnements en guerre 53
2.1. VIOLENCES GUERRIERES ET BRUTALISATION ENVIRONNEMENTALE AU XXE SIECLE 53
2.2. GUERRES POLLUANTES. UNE REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 56
3. Problématique posée et cadre de la recherche 62
3.1. PROBLEMATISATION 62
3.2. CADRE TEMPOREL 63
3.3. CADRE GEOGRAPHIQUE 63
4. Articulation du manuscrit et de la recherche 64
Sources, corpus documentaire et archivistique 67
1. Documents et archives 67
2. Exploitation de photographies aériennes anciennes 69
3. Observations, reconnaissances de terrain, caractérisation de l'état des milieux ... 70
3.1. RECONNAISSANCES DE TERRAIN 70
3.2. ETUDES, RECHERCHES ENVIRONNEMENTALES ET HISTORIQUES 71

Volet historique

Section 1h 73
Chargement et compositions des engins de guerre. 73
1. Introduction de la Section 1h 73
2. Prolégomène. Munitions et artillerie durant la Première Guerre mondiale 74
2.1. OBUS ET PROJECTILES 74
2.2. DIVERSITE DES PIECES D'ARTILLERIE. 82
2.3. GRENADES 87
2.4. BOMBES D'AVIATION 87
2.5. AUTRES MATERIELS PYROTECHNIQUES 88
2.6. DEFINITIONS ET GENERALITES CONCERNANT LES MATIERES ENERGETIQUES ET AGRESSIVES DES CHARGEMENTS 88
3. Composition des poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale. 93
3.1. OBJECTIFS ET DEMARCHE DE LA RECHERCHE 93
3.2. APPROCHE DOCUMENTAIRE ET HISTORIQUE 93
3.3. AU DELA DES ARCHIVES. UN ECLAIRAGE ANALYTIQUE NOUVEAU SUR LA COMPOSITION DES POUDRES ET EXPLOSIFS DE LA GRANDE GUERRE. 156
4. Résumé et conclusions de la Section 1h. Le kaléidoscope chimique de la Grande Guerre 196

Section 2h 200
Devenir spatial et temporel des composés énergétiques dans l'environnement 200
1. Introduction générale de la Section 2h 200
2. Processsus de transformation biotiques et abiotiques 202
2.1. COMPOSES NITROAROMATIQUES 202
2.2. TRANSFORMATION DES ADJUVANTS / STABILISANTS DES ERGOLS SOLIDES NITROCELLULOSIQUES 211
2.3. DEGRADATION ENVIRONNEMENTALE DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE .. 215
2.4. DEVENIR ENVIRONNEMENTAL DES IONS NITRATE (NO_3^-) ET AMMONIUM (NH_4^+) 216
2.5. REACTIVITE DES AGENTS CHIMIQUES TOXIQUES DE GUERRE 218
3. Sorption et immobilisation 220
3.1. GENERALITES 220
3.2. ADSORPTION DES COMPOSES NITROAROMATIQUES 221
3.3. ADSORPTION DES CONSTITUANTS DES ERGOLS SOLIDES NITROCELLULOSIQUES 223

3.4. ADSORPTION DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE 224
4. Résumé et conclusions de la Section 2h 225

Section 3h 230
La Grande Guerre de l'artillerie. L'arme gagneuse de bataille 230
1. Introduction de la Section 3h 230
2. L'Artillerie. De l'ombre à la lumière. 1850-1914 230
2.1. UNE ARME EN PEINE D'INNOVATIONS 230
2.2. LA SECONDE REVOLUTION INDUSTRIELLE. L'ESSOR DE LA CHIMIE DE SYNTHESE. LORSQUE L'APPRENTI SORCIER S'EN VA EN GUERRE 231
2.3. LA DEMONSTRATION ECRASANTE DE LA PUISSANCE D'UNE ARTILLERIE ALLEMANDE AGUERRIE 232
2.4. UNE ARTILLERIE FRANÇAISE DANS L'OMBRE DE L'INFANTERIE 234
2.5. UNE REPONSE HUMANISTE A LA MILITARISATION INHUMAINE : LES BONNES INTENTIONS DE LA HAYE 236
3. La Première Guerre mondiale sur le front occidental 238
3.1. 1914. DE L'ETE ROUGE SANG, GARANCE, A LA BOUE DES FLANDRES. 238
3.2. 1915. L'IMPASSE D'UNE ANNEE TERRIBLE 257
3.3. 1916. L'INVENTION ET L'AFFIRMATION DES « HYPERBATAILLES » 262
3.4. 1917, L'ANNEE CHARNIERE, L'ANNEE D'ANGOISSE 267
3.5. 1918. LA RUPTURE DES EQUILIBRES ET LE RETOUR D'UNE GUERRE DE MOUVEMENT 274
3.6. NOVEMBRE 1918. LA TOMBEE DE RIDEAU SUR LE THEATRE DES OPERATIONS. QUAND « *LE BRUIT D'UNIVERSELLE DESTRUCTION FAIT SILENCE* » 279
4. *In Stahlgewittern* 283
4.1. DEMULTIPLICATION DES CALIBRES AVEC L'AFFIRMATION D'UNE ARTILLERIE TOUJOURS PLUS PUISSANTE 283
4.2. DIVERSIFICATION DES USAGES ET DES CHARGEMENTS 283
4.3. DE NOUVEAUX MATERIELS ET TACTIQUES ADAPTES DE LA GUERRE DE POSITION 283
4.4. INNOVATIONS MECANIQUES AU FRONT : CHARS ET AVIONS 300
4.5. LES TACTIQUES DE L'ARTILLERIE ET LEURS EVOLUTIONS 304
4.6. L'ESCALADE VERS UNE HYPERVIOLENCE GUERRIERE 308
4.7. UN BREF BILAN HUMAIN ET MATERIEL 319
5. Résumé et conclusions de la Section 3h 321

Section 4h. 325
Devenir des munitions tirées et des charges de destruction 325
1. Introduction de la Section 4h 325
2. Les trois régimes de fonctionnement et dysfonctionnement des engins tirés 325
3. Fonctionnement dégradé des munitions tirées. Phénomènes, origines et conséquences. 326
3.1. LES ACCIDENTS DE TIR. DETONATIONS PREMATUREES CATASTROPHIQUES 326
3.2. LES INCIDENTS DE TIR DE L'ARTILLERIE. DETONATIONS PARTIELLES OU INEXISTANTES DES PROJECTILES 327
3.3. POURCENTAGE D'INCIDENTS LORS DES TIRS 333
4. Fourneaux de mines dysfonctionnels 336
5. Résumé et conclusions de la Section 4h 336

Section 5h. 338
Récupération et destruction des Restes Explosifs de Guerre dans la dynamique de la Grande Guerre 338
1. Introduction de la Section 5h. 338
1.1. 1914. EMERGENCE DE PROBLEMATIQUES INEDITES ENTRE MARNE ET AISNE 341
1.2. PREMIERES INSTRUCTIONS POUR LA RECUPERATION AU SEIN DE L'ARMEE FRANÇAISE 345
1.3. 1916 ET LE COMITE INTERMINISTERIEL POUR AIDER A LA RECONSTITUTION DES REGIONS ENVAHIES. ATTENDRE OU POURSUIVRE ? 346

1.4. 1916. RECUPERATION PAR LES *SALVAGE.* UNE PREOCCUPATION INTERALLIEE . 349
1.5. 1916-1918. LA CREATION DE SERVICES ET DE DETACHEMENTS SPECIAUX DE LA RECUPERATION 350
2. Procédés de neutralisation des REG et autres engins de guerre « irrécupérables » 364
2.1. IDENTIFIER, TRIER ET ORIENTER 364
2.2. METHODE DE DESTRUCTION DES REG 364
2.3. INSTRUCTIONS AMERICAINES SPECIALES POUR LA NEUTRALISATION DES PROJECTILES CHIMIQUES 369
2.4. RECUPERATION PARTIELLE. DEMONTAGE DES MUNITIONS A DETRUIRE PAR LES BRITANNIQUES. UN CAS UNIQUE A WANQUETIN, 1917 ? 370
3. Résumé et conclusions de la Section 5h 372

Section 6h. 376
« *The iron harvest* ». Restes Explosifs de Guerre abandonnés et surplus au terme des hostilités. Origines, géographie et enjeux. 376
1. Introduction de la Section 6h. 376
« Les Allemands ont laissé de ces trésors, personne n'accorde même un regard à ces réserves abandonnées sur place » 376
2. Origine et géographie 376
2.1. TYPOLOGIE 376
2.2. GEOGRAPHIE ET ORIGINES 377
2.3. AUTOMNE 1918. L'ABANDON SUR LES ANCIENS TERRITOIRES OCCUPES DES MUNITIONS PAR LES TROUPES ALLEMANDES EN RETRAITE 380
2.4. MUNITIONS INITIALEMENT ABANDONNEES PAR LES FRANÇAIS ET LES ALLIES .. 391
2.5. ABANDON SOUS TERRE DE MATERIEL DE GUERRE AU TERME DES CONFRONTATIONS CHTONIENNES 394
3. Loin du front. Les surplus de guerre 399
3.1. GEOGRAPHIE 399
3.2. DEFINITION ET TYPOLOGIE 399
3.3. GENESE ET ORIGINE 400
4. Surplus ex-allemands des anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (*Reichsland Elsass-Lothringen*). 402
4.1. MAINMISE FRANÇAISE SUR LES SURPLUS EX-ALLEMANDS 402
4.2. UN TERRITOIRE CONCERNE PAR DEUX PROBLEMATIQUES GEOGRAPHIQUEMENT DISTINCTES 403
4.3. SURPLUS EX-ALLEMANDS ABANDONNES SUR LE TERRITOIRE D'ALSACE LORRAINE 403
4.4. DESCRIPTIFS ET CONNAISSANCES HISTORIQUES RELATIFS AUX DEPOTS DE MUNITIONS MAJEURS EX-ALLEMANDS DU TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE 409
5. Tonnages des surplus et Restes Explosifs de Guerre. Proposition quantitative et discussion 417
5.1. TYPOLOGIE DES RESTES DE GUERRE, MUNITIONS EN EXCES, OBSOLETES OU HORS SERVICE. SYNTHESE 417
5.2. SITUATION AU MOMENT DE LA CESSATION DES HOSTILITES 417
5.3. UNE INFLATION DU TONNAGE DE MUNITIONS EN EXCES, OBSOLETES ET HORS SERVICE DANS L'ENTRE-DEUX-GUERRES ? 421
6. Restes Explosifs de Guerre. Quelles problématiques pour quels enjeux ? 424
6.1. INTRODUCTION 424
6.2. UN FREIN A LA RECONQUETE DES TERRES AGRICOLES DEVASTEES 424
6.3. UNE MENACE POUR LES POPULATIONS GENERALES CIVILES SINISTREES ET UN FREIN AU RETOUR DES DEPLACES 425
6.4. UN OBSTACLE A LA RESTAURATION DES DROITS FONCIERS ET A LA LIBRE JOUISSANCE DE LA PROPRIETE PRIVEE 427
6.5. L'ENCOMBREMENT DES VOIES DE CHEMIN DE FER PAR DES CONVOIS DANGEREUX. UNE LOGISTIQUE DE LA RECONSTRUCTION MATERIELLE ENTRAVEE. 428
6.6. LA RECONSTRUCTION INDUSTRIELLE A SECURISER 430

6.7. LA PRESENCE ANXIOGENE DES RESTES DE GUERRE ABANDONNES 430
6.8. L'ENLEVEMENT DES ENGINS DE GUERRE : L'AFFIRMATION D'UNE IMPERIEUSE NECESSITE 434
7. Résumé et conclusions de la Section 6h 440

Section 7h 444
1918-1919. La gestion des Restes Explosifs de Guerre dans les reconstructions. L'interventionnisme étatique de première urgence *post-bellum* 444
1. Introduction de la Section 7h 444
2. Réinventer la gouvernance civile dans la transition entre temps de guerre et temps de paix 444
3. La récupération dans l'immédiate sortie de guerre. Entre rupture et continuité (octobre 1918-janvier 1919) 449
3.1. REBATTRE LES CARTES DE LA RECUPERATION AVEC LA CESSATION DES HOSTILITES 449
3.2. DES SERVICES TEMPORAIRES DE PREMIERE URGENCE A LA PEINE. ORIGINES ET CONSEQUENCES D'UNE RECUPERATION DYSFONCTIONNELLE DANS L'IMMEDIATE SORTIE DE GUERRE 453
4. Février 1919. Accélération de la récupération par celle des reconstructions 457
4.1. REFONTE DE LA RECUPERATION 457
4.2. UNE MAIN D'ŒUVRE MILITAIRE ET CIVILE COSMOPOLITE 459
4.3. TENSIONS INTERALLIEES ET LA DEMOBILISATION DES *SALVAGE* BRITANNIQUE ET AMERICAIN EN FRANCE 461
5. L'exceptionnelle accumulation de projectiles dans le canton et en forêt de Spincourt. L'exemple des opérations de rassemblement des REG des 2e et 6e Régions militaires en Meuse 463
5.1. INTRODUCTION. LES DEPOTS DE RASSEMBLEMENT 463
5.2. MUNITIONS CHIMIQUES DE LA 2E REGION MILITAIRE : RASSEMBLEMENT EXCEPTIONNEL DANS LE CANTON DE SPINCOURT (MEUSE) 465
5.3. RASSEMBLEMENT DES MUNITIONS CHIMIQUES DE LA 6E REGION MILITAIRE 470
5.4. RESUME ET CONCLUSIONS 471
6. Méthodes et moyens de gestion des REG et des risques. Approches préventives et curatives 472
6.1. INFORMER, PREVENIR. « *NE TOUCHEZ PAS AUX MUNITIONS* » 472
6.2. PRIORISATION DES ACTIONS DANS L'APPROCHE CURATIVE DU DESOBUSAGE 473
6.3. PRISE EN CHARGE DES REG ET PRIORISATION DES DESTRUCTIONS 475
6.4. COMMENT ELIMINER LES MUNITIONS ? 477
6.5. RECUPERATION ET DESTRUCTION DE MUNITIONS PAR LES FORCES ALLIEES EN FRANCE ET EN BELGIQUE 488
7. L'urgence d'éliminer les anciens dépôts chimiques ex-allemands de Spincourt et de la Hardt. Premières tentatives ajournées du désobusage contractuel privé 493
7.1. VERS UNE DEMOBILISATION MILITAIRE ET UNE MOBILISATION INDUSTRIELLE POUR DESOBUSER 493
7.2. PREMIERES TENTATIVES DE CONTRACTUALISATION AVEC DES ENTITES PRIVEES 493
7.3. UNE CONTRACTUALISATION EN GRE A GRE POUR PARER A L'URGENCE D'OPERATIONS EXCEPTIONNELLES 494
7.4. TRANSFERT CONTRACTUEL DES RESPONSABILITES 495
7.5. LA SUSPENSION DU CHANTIER DE SPINCOURT : SE LAISSER DU TEMPS POUR LA SECURITE 496
7.6. CONCLUSIONS 499
8. Données relatives aux quantités de REG démolies à la fin 1919 500
9. Résumé et conclusions de la Section 7h 501

Section 8h **505**
1920-1941, tirer profit des Restes Explosifs de Guerre. L'essor et le déclin du désobusage industriel et commercial des champs de bataille **505**
1. Introduction de la Section 8h **505**
2. Le tournant de 1920 ..... **505**
2.1. DEMOBILISATION ET L'AMENUISEMENT DE LA MAIN D'ŒUVRE MILITAIRE 505
2.2. DES DECHETS DE GUERRE AUX GISEMENTS DE MATIERES PREMIERES SECONDAIRES. 506
2.3. LE RECOURS GENERALISE PAR L'ETAT AU DESOBUSAGE EXTERNALISE PAR VOIE CONTRACTUELLE 507
3. Ferrailleurs versus désobuseurs. Croiser le fer pour le profit (1920-1929) **509**
3.1. FAILLES ET FAIBLESSES D'UN DISPOSITIF CONTRACTUEL 509
3.2. FRAUDES, PRATIQUES ILLICITES ET ACCIDENTOGENES : L'EXECUTION CHAOTIQUE DU DESOBUSAGE CONTRACTUEL 512
3.3. ETAT DES LIEUX EN 1929. GEOGRAPHIE DES SECTEURS DE DESOBUSAGE DES 1ER, 2E ET 6E REGIONS MILITAIRES 516
4. 1930. Récupération et désobusage sous marché unique **518**
5. Un désobusage des années 30. De la Der-des-Ders à la Seconde Guerre mondiale **520**
5.1. UN DESOBUSAGE INDUSTRIEL PERCUTE DE PLEIN FOUET PAR LA CRISE ECONOMIQUE MONDIALE. 520
5.2. LEON BERGE. UN DESOBUSEUR ET RECUPERATEUR ARRAGEOIS EN TERRES MEUSIENNES 524
5.3. LE GLISSEMENT TOURMENTE DU DESOBUSAGE D'UNE GUERRE A L'AUTRE. SUITE ET FIN DE L'ELIMINATION INDUSTRIELLE DES ENGINS DE 1914-1918 527
5.4. LA SECONDE GUERRE MONDIALE. POINT D'ARRET DU DESOBUSAGE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL ? 532
6. Résumé et conclusions de la Section 8h **533**

Section 9h **536**
Libération du Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL) des Restes Explosifs de Guerre et surplus ex-allemands. Pour en finir avec l'ancien occupant **536**
1. Introduction de la Section 9h **536**
2. Contexte historique. Le malaise alsacien-lorrain **536**
2.2. LES SURPLUS DE MUNITIONS EX-ALLEMANDES DELAISSES SUR LE TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE (RAPPEL) 542
2.3. ENJEUX ET MOTIVATIONS DU DESOBUSAGE DU TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE 543
2.4. RELEVER LES RUINES, SECURISER LES LIEUX DE MEMOIRE SYMBOLIQUES ET PROTEGER LES POPULATIONS 544
3. Désobusage des anciens champs de bataille du Territoire d'Alsace-Lorraine **546**
3.1. PREMIERE PERIODE. DESOBUSAGE PRECOCE (NOVEMBRE 1918 – OCTOBRE 1919) 547
3.2. SECONDE PERIODE (NOVEMBRE 1919-AVRIL 1921) 552
3.3. TROISIEME PERIODE (1921-1930) 553
3.4. REVISION DE L'ORGANISATION DU DESOBUSAGE DANS LES ANNEES 30 556
4. Evacuation des dépôts de munitions et liquidation des surplus du Territoire d'Alsace-Lorraine **557**
4.1. INTRODUCTION. CADRE GENERAL 557
4.2. LES CHANTIERS DE DESTRUCTION DE MUNITIONS CLERE & SCHWANDER DE LA FORET DE LA HARDT (*HARTWALDLAGER*) 559
4.3. EXPLOITATION DU CHANTIER DE DEMOLITION DE MUNITIONS EXPLOSIVES EN FORET D'ILLKIRCH PAR L'ENTREPRISE BOUXIN 568
4.4. L'HISTOIRE SINGULIERE DE LA DEMOLITION DES MUNITIONS EX-ALLEMANDES DU TERRITOIRE DE LORRAINE (DEPARTEMENT DE LA MOSELLE). 575
5. Reprise des surplus ex-allemands de la Grande Guerre. Trait d'union d'une guerre à l'autre **584**
6. Résumé et conclusions de la Section 9h **587**

Section 10h 593
Loin du front et au-delà des frontières. Une histoire européenne de la liquidation des surplus et Restes Explosifs de Guerre 593
1. Introduction de la Section 10h 593
1.1. LA MISE EN PLACE DE SERVICES D'ETAT POUR LA LIQUIDATION DES STOCKS 595
2. Enjeux et problématiques motivant la liquidation des surplus de guerre 596
3. Liquidation des surplus obsolètes 598
3.1. LES EXCEDENTS MILITAIRES 598
3.2. LES EXCEDENTS INDUSTRIELS 605
3.3. DEMOLITION DES MUNITIONS EXCEDENTAIRES PAR LE CORPS EXPEDITIONNAIRE FRANÇAIS EN LOMBARDIE (ITALIE) 609
4. Liquidation des surplus britanniques en France et en Belgique. L'aventure industrielle du géant du désobusage Francis Norman Pickett 612
4.1. FRANCIS NORMAN PICKETT. CET ILLUSTRE INCONNU DE L'ENTRE-DEUX-GUERRES 612
4.2. L'EXPLOITATION POUSSIVE DE LA *C-FACTORY* . L'ERADICATION DES DEPOTS EX-ALLEMANDS DE TRELON & LIESSIES 618
4.3. L'ASCENSION D'UN GEANT DU DESOBUSAGE INDUSTRIEL 632
4.4. L'USINE *B-FACTORY* DE F.N. PICKETT & FILS DE WESTROOZEBEKE, ... 638
4.5. VERS UNE PORTE DE SORTIE DE L'AVENTURE INDUSTRIELLE DE F.N. PICKETT & FILS EN FRANCE. LA CLAIRIERE NOIRE DE LA FORET DE SPINCOURT, EN MEUSE (1926 – 1927). 643
4.6. DECHARGER OU COULER LES OBUS CHIMIQUES ? LE COUPERET DU COUTS / BENEFICES 648
4.7. LE CHEMIN DE CROIX ET LE NAUFRAGE DE L'ENTREPRISE 651
4.8. ELIMINATIONS DES SURPLUS D'EXPLOSIFS ET D'ENGINS DE GUERRE EN GRANDE-BRETAGNE 656
5. Liquidation des surplus de guerre en Allemagne 658
5.1. LA DEMILITARISATION DE L'ALLEMAGNE ET L'OCCUPATION DE LA RHENANIE EN REPONSE AUX EXIGENCES DE L'ARMISTICE ET DU TRAITE DE PAIX. CADRE HISTORIQUE 658
5.2. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE. INTRODUCTION ET PHASAGE 664
5.3. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE (ZONE NON OCCUPEE). 665
5.4. LIQUIDATION DES MUNITIONS ET MATERIELS DE GUERRE EN ALLEMAGNE SOUS OCCUPATION AMERICAINE ET BRITANNIQUE 675
5.5. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE SOUS OCCUPATION FRANÇAISE. UNE HISTOIRE FRANCO-ALLEMANDE. 685
6. Résumé et conclusions de la Section 10h 689

Section 11h 699
Déchargement de munitions à des fins de récupération. Organisation, procédés et moyens 699
1. Introduction de la Section 11h 699
2. Personnels et main-d'œuvre affairés au déchargement et à la démolition des munitions 699
2.1. UNE MAIN D'ŒUVRE COSMOPILITE 699
2.2. DES COMMUNAUTES DE TRAVAILLEURS QUI AVAIENT MAUVAISE PRESSE 702
2.3. BILAN HUMAIN 703
3. Localisation et organisation des centres de déchargement et d'élimination d'engins de guerre 705
3.1. CRITERES MOTIVANT LE CHOIX DES IMPLANTATIONS DES CENTRES DE DESTRUCTION 705
3.2. DES INSTALLATIONS TEMPORAIRES ERIGEES EN URGENCE EX-NIHILO 707
4. Méthodes et moyens de déchargement des Restes Explosifs de Guerre à des fins de récupération 709
4.1. TRI ET INSPECTION PREALABLE DES ENGINS DANS LES DEPOTS ET CENTRES DE RASSEMBLEMENT 709
4.2. DESTRUCTION DES REG INDEMONTABLES PAR OPEN DETONATION 712

4.3. ETAPES DU DEMONTAGE ET DU DECHARGEMENT DES MUNITIONS (RECUPERATION DES MATIERES VALORISABLES) 712
4.4. LA RECUPERATION DE MATIERES A HAUTE VALEUR AJOUTEE DEPUIS LES CHARGEMENTS EXPLOSIFS OU TOXIQUES 742
4.5. DESTRUCTION DES OBUS A BALLES ET *SHRAPNELS* 744
4.6. DESTRUCTION MECANISEE DES GRENADES (*CRUSHING*) 745
4.7. DESTRUCTION ET RECUPERATION DES MATERIAUX DES ARMES PORTATIVES 745
5. Résumé et conclusions de la Section 11h 746

Section 12h 751
Destruction des REG de l'entre-deux-guerres. Inventaire des sites et bilan des tonnages détruits 751
1. Introduction de la Section 12h 751
1.1. OBJECTIFS 751
1.2. METHODES ET MOYENS 751
1.3. POSSIBILITES ET LIMITES 751
2. Distribution geographique des sites 752
3. Typologie des sites identifies 756
3.1. MODALITES DE DESTRUCTION 756
3.2. EXPLOITANTS CONCERNES 757
4. Inventaire des sites de destruction de munitions chimiques 758
5. Invisibilisation des activités et opérations d'élimination des REG de l'entre-deux-guerres 760
5.1. DES ENREGISTREMENTS ARCHIVISTIQUES LACUNAIRES ET ATOMISES 760
5.2. AMNESIE COLLECTIVE OU REFOULEMENT MEMORIEL ? 761
6. Proposition de quantification des tonnages détruits 764
7. Résumé et conclusions de la Section 12h 767
Résumé et conclusions du volet historique 769

Volet environnement

Introduction générale & problématique posée 792
1. Anomalies (hydro)géochimiques, pollutions concentrées et risques 792
2. Zones de pollution concentrées potentielles de la Grande Guerre 795
3. Problématisation et articulation de la recherche environnementale 796

Section 1e. 797
Munitions et engins de guerre tirés sur le front occidental. Sources anciennes de pollution actuelles des champs de bataille ? 797
1. Introduction de la Section 1e 797
2. Les régimes de fonctionnement et dysfonctionnement des munitions tirées 798
3. Modalités d'introduction dans les sols des composés d'origine pyrotechnique selon les régimes de détonation 800
3.1. INTRODUCTION. PHENOMENOLOGIE GENERALE 800
3.2. DECONFINEMENT INSTANTANE DES CHARGEMENTS DES MUNITIONS PAR DETONATION DE HAUT-ORDRE 801
3.3. MOBILISATION DES COMPOSES DES MATIERES ENERGETIQUES VERS L'ENVIRONNEMENT PAR DISSOLUTION 817
4. Résumé et conclusions de la Section 1e 821

Section 2e 825
Terrains de destruction par éclatement (*Open Detonation*) de la Première Guerre mondiale. Sources ponctuelles de pollution concentrée ? Etat des connaissances et discussion 825
1. Introduction de la Section 2e 825

2. Etat des connaissances sur la qualité des sols impactés par les destructions par OD et retours d'expérience étrangers 826
2.1. EXEMPLE DE L'ALLEMAGNE 826
2.2. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSES DES SOLS SUR TROIS SITES DE PETARDEMENT EN FRANCE 831
2.3. POLLUTIONS ET DESTRUCTIONS DE REG PAR OD EN FOURNEAUX. RETOUR D'EXPÉRIENCE DE BOSNIE HERZÉGOVINE ET DES USA. 837
2.4. CONCLUSION 838
2.5. INTRODUCTION DE RÉSIDUS D'EXPLOSIFS DANS LES SOLS SUITE À LA DESTRUCTION PAR ÉCLATEMENT DE MUNITIONS ANCIENNES. 839
3. Organisation des entonnoirs de démolition par OD et des terrains d'explosion .. 845
3.1. GENESE DES ENTONNOIRS ET POLYGONES DE DESTRUCTION 845
4. Etude de cas. L'exemple des champs d'explosion du complexe de désobusage Clere & Schwander de Vaudoncourt Loison et de Noire Fontaine (Vaudoncourt) dans le canton de Spincourt (Meuse). 853
4.1. DECOUVERTE FORTUITE DE POLLUTION HISTORIQUES ET GENESE D'UNE SITUATION DE CRISE 853
4.2. TERRAINS D'EXPLOSION DE VAUDONCOURT LOISON 856
4.3. LE CHAMP D'EXPLOSION DE NOIRE FONTAINE A VAUDONCOURT 869
5. Résumé et conclusions de la Section 2e 874

Section 3e 878
***Open Burning* et *Burning Grounds*. *Fingerprint* environnemental des résidus et pollutions générés par les opérations historiques de liquidation des Restes Explosifs de Guerre par brûlage 878**
1. Introduction de la Section 3e 878
1.1. DEFINITIONS ET OBJECTIFS 878
1.2. *BURNING GROUNDS* . TERRAINS D'ETUDE 879
2. Processus de caractérisation, méthodes et moyens 885
2.1. RECHERCHES PIONNIERES ALLEMANDES 885
2.2. SITES DE LA « PLACE A GAZ » ET DU COMPLEXE DE DESOBUSAGE CLERE & SCHWANDER EN MEUSE. SITES PILOTES DE REFERENCE 886
2.3. DEMARCHE DE DIAGNOSTIC DES TERRAINS ET TRANCHEES DE BRULAGE. METHODES ET MOYENS. 887
2.4. RECAPITULATIF ET SYNTHESE DES ECHANTILLONS ET ANALYSES DE SOLS ET RESIDUS DE BRULAGE REALISES ET EXPLOITES DANS LE CADRE DE CETTE RECHERCHE 894
3. *Burning Grounds*. Description et caractéristiques physiques des terrains et résidus de brûlage 897
3.1. DES TERRAINS DE BRULAGE DIVERSEMENT CONSERVES 897
3.2. UNE EMPREINTE PAYSAGERE PHYTOTOXIQUE FORTE. BIOINDICATION DE POLLUTIONS SEVERES DES SOLS DE SURFACE AU DROIT DES TERRAINS DE BRULAGE 897
3.3. RECONNAISSANCES INDIRECTES ET/OU DIRECTES DES RESIDUS ET DES TERRAINS DE BRULAGE. MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE 906
3.4. LES RESIDUS DE BRULAGE, TYPOLOGIE ET ELEMENTS PHYSIQUES CONSTITUTIFS 916
4. Caractérisation chimique des résidus de brûlage et des pollutions des sols associées. Le *Fingerprint* des opérations de brûlage 924
4.1. METAUX ET METALLOÏDES (ELEMENTS TRACES METALLIQUES, ETM) 924
4.2. CHLORURE, CHLORATE, PERCHLORATE, NITRATE ET AMMONIUM 942
4.3. COMPOSES NITROAROMATIQUES ET RESIDUS DES POUDRES ET EXPLOSIFS 943
4.4. TOXIQUES DE GUERRE ET DERIVES 958
5. Polluants des sols et des résidus de brûlage. Géoindicateurs des Restes Explosifs de Guerre et des pratiques de brûlage 967
5.1. INTRODUCTION 967
5.2. *FINGERPRINT* DES RESIDUS ISSUS D'OPERATIONS DE DECHARGEMENT PAR BRULAGE DE PROJECTILES ARSENIES A CROIX BLEUE 967

5.3. TRACEURS DE LA NEUTRALISATION D'ENGINS A CHARGEMENT CHIMIQUE TOXIQUE NON ARSENIE 976
5.4. L'ETAIN. UNE SINGULARITE EN LIEN AVEC LA NEUTRALISATION DE PROJECTILES CHIMIQUES 979
5.5. LES POLYCHLORODIBENZO-P-DIOXINES (PCDD) ET POLYCHLORODIBENZO-FURANES (PCDF). TEMOINS MUETS ET PERSISTANTS DES CONDITIONS ET PRATIQUES DE BRULAGE DES REG ? 981
6. Résumé et conclusions de la Section 3e 1008

Section 4e 1016
Caractéristiques et origine(s) du marquage des eaux souterraines par les ions perchlorate et les résidus d'explosifs. Une empreinte de la Grande Guerre et/ou de la sortie de guerre ? 1016
1. Introduction de la Section 4e 1016
2. Campagne nationale ANSES et régionale (PRSE3 Grand'Est) dans les EDCH. Une nouveauté dans les eaux souterraines 1017
2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS 1017
2.2. PROTOCOLES ANALYTIQUES APPLIQUES (RAPPEL) 1019
2.3. ECHANTILLONNAGE REALISE 1020
2.4. RESULTATS 1024
2.5. CONCLUSION 1033
3. Etudes sectorielles 1035
3.1. METHODES, MOYENS ET DEMARCHE RETENUS 1035
3.2. L'ARGONNE ET LA BUTTE DE VAUQUOIS 1044
3.3. LE FRONT DES VOSGES. ETUDES SECTORIELLES AU LINGEKOPF ET A LA CHAPELOTTE 1086
3.4. ETUDE SECTORIELLE DE LA REGION DE SUIPPES 1107
3.5. ETUDE APPROFONDIE DE LA CHIMIE DES EAUX DES PUITS AEP DE NEUFCHATEL-SUR-AISNE ET DE CRAMONT 1116
4. Cortèges de composés d'origine pyrotechnique dans les eaux. *Fingerprint* des sources ou des processus environnementaux ? 1124
4.1. INTRODUCTION 1124
4.2. *FINGERPRINT* DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE. UNE APPROCHE ANALYTIQUE ET ISOTOPIQUE 1124
4.3. *FINGERPRINT* DES COMPOSES NITROAROMATIQUES (NAC) ET DES ISOMERES DU DINITROTOLUENE (DNT). 1129
5. Origines et sources des composés d'origine pyrotechnique dans les eaux du quart nord-est de la France 1135
5.1. ORIGINES ET SOURCES DES COMPOSES D'ORIGINE PYROTECHNIQUE DANS LES EAUX. ENSEIGNEMENTS TIRES DES ETUDES SECTORIELLES 1135
5.2. LA GRANDE GUERRE ET LA SORTIE DE GUERRE DANS LES EAUX DU QUART NORD-EST DE LA FRANCE 1142
6. Résumé et conclusions de la Section 4e 1149

Résumé et conclusions du volet environnemental 1157

Conclusions

Résumé, conclusions générales et perspectives 1174

Références et sources

Références bibliographiques et sources 1208
Autres 1234
Documents numérisés à la Bibliothèque nationale de France (BnF) 1234
Sources iconographiques 1238
Publications scientifiques 1247

Annexes

Annexes 1262

Table des illustrations

Figure 1 : Concentrations en ions perchlorate dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) en régions Hauts-de-France et Grand 'Est. Agrégation des données ARS (2011-2014). Position des principales lignes du front occidental de la Première Guerre mondiale. 48

Figure 2 : Extrait du Républicain Lorrain du 17 septembre 2015. 51

Figure 3 : Culots de deux obus allemands de 105 mm ;. 75

Figure 4 : Exemples de fusées d'artillerie allemandes. 77

Figure 5 : Gaine-relai modèle 1898 à filetage long armant les obus explosifs français de 270 mm, de 240 mm type Perruchon, les obus spéciaux français de 120 mm à 155 mm en fonte aciérée et les obus spéciaux français en acier de 145 mm et 155 mm modèle 1890.. 78

Figure 6 : Poids des projectiles et des chargements des projectiles explosifs de l'artillerie lourde française. 79

Figure 7 : Obus allemands de 77 mm encartouché. Douaumont, département de la Meuse. 80

Figure 8 : Schéma de principe d'un coup complet comprenant un obus explosif. 81

Figure 9 : Coups complets d'obus à balles à charge arrière (en haut). chimique à Croix bleue (renfermant un fiole d'arsine vomitive) (au centre) et chimique à réservoir (renfermant un toxique liquide) (en bas) (schéma de principe). 81

Figure 10 : Exemple de pièces d'artillerie de la Grande Guerre. 84

Figure 11 : Tir tendu et tir à trajectoire parabolique. 85

Figure 12 : Quelques projectiles de tranchées de 1914-1918. Aperçu photographique. 86

Figure 13 : Bombes d'aviation allemandes de (gauche à droite) 12,5, 50, 100, 300 et 1 000 kg. 87

Figure 14 : Classification des matières énergétiques 90

Figure 15 : Formule structurale des ions chlorate et perchlorate. 94

Figure 16 : Tirs d'épreuve de Minenwerfer lourds allemands.. 100

Figure 17 : Projectile français empenné à ailettes de 58 T type DLS montrant son chargement interne gris-bleuté d'explosif perchloraté. 104

Figure 18 : Perdite et papier d'emballage de pains de Perdite de 1 kg découverts dans un système A3 de galeries profonde allemande, La Haute Chevauchée, Argonne est (département de la Meuse). octobre 2021. 106

Figure 19 : Stocks et consommation mensuelle française de nitrate de sodium (en tonnes), juillet 1915-octobre 1918. 112

Figure 20 : Formules structurales du TNT, de la Mélinite, du dinitrotoluène et de la Crésylite 113

Figure 21 : Schéma de principe de la production de mélinite et de TNT à la Poudrerie nationale de Saint-Chamas (département des Bouches-du-Rhône) durant la Première Guerre mondiale. 114

Figure 22 : Kristian Birkeland (à gauche) et Sam Eyde (à droite). 117

Figure 23 : Fritz Haber (à droite) et Carl Bosch (à gauche). 119

Figure 24 : Production mondiale de nitrates du Chili, de sulfate d'ammonium, de cyanamide de calcium et d'ammoniac synthétique..... 120

Figure 25 : Usages des sources d'azote de synthèse et d'azote naturel dans la production de matières énergétiques..... 121

Figure 26 : Formules structurales du benzène, toluène, phénol et crésol. 124

Figure 27 : Formules structurales dinitronaphtalène et de l'acide stéarique..... 125

Figure 28 : Formules structurales du monochlorobenzène, chloronitrobenzène, dinitrophénol et du nitronaphtalène..... 126

Figure 29 : Formules structurales du dinitrobenzène, dinitrotoluène, trinitroanisole et de la nitroglycérine. 129

Figure 30 : Formules structurales de la Tétranitrométhylaniline (Tétryl) et de la Hexanitrodiphénylamine 130

Figure 31 : Paul Marie Eugène Vieille (2 Septembre 1854-14 Janvier 1934)..... 132

Figure 32 : Epave déchiquetée du cuirassé d'escadre Liberte, dans la rade de Toulon, apres la catastrophe du 25 septembre 1911..... 134

Figure 33 : (i) Différents conditionnements de la nitrocellulose (à gauche). (ii) Fagots de nitrocellulose Cordite allemande acheminés par des artilleurs britanniques sur un terrain de brûlage en vue de leur destruction (à droite) à proximité de Cologne, Allemagne. 1919. 135

Figure 34 : Formules structurales de la nitrocellulose, de la diphénylamine et de l'ethyl Centralite (Centralite 1)..... 135

Figure 35 : Formules structurales de l'Ypérite, de la diphénylchlorarsine et de la diphénylcyanoarsine. 140

Figure 36 : Radiographie de deux obus chimiques français de 75 mm à chargement liquide de la Première Guerre mondiale montrant la gaine d'éclatement en place à l'œil et l'espace de tête laissé vide à l'ogive..... 141

Figure 37: Obus chimiques français de 75 mm modèles 1900 et 1915 après fonctionnement (à gauche) et éclatement de projectiles chimiques (à droite)..... 141

Figure 38 : Formules structurale de quelques thianes rencontrées en impuretés dans les Ypérites. 142

Figure 39 : Corrélations entre teneurs en zinc et teneurs en cadmium des minerais de zinc de gisements allemands exploités durant la Première Guerre mondiale. 145

Figure 40 : Evolution (1914-1918) des tonnages journaliers moyens en explosifs azotés livrés aux armées en France..... 148

Figure 41 : Tonnages moyens journaliers en explosifs (per)chloratés livrés aux armées entre 1914 et 1918 en France et tonnage total cumulé..... 148

Figure 42 : Evolution (1914-1918) des tonnages journaliers moyens en poudres produits et importés en France..... 149

Figure 43 : Proportions relatives des tonnages des explosifs nitroaromatiques produits par l'Allemagne durant la Première Guerre mondiale. 150

Figure 44 : Tonnages d'explosifs produits et importés par la Grande-Bretagne durant la Première Guerre mondiale. 151

Figure 45 : Tonnages de poudres et explosifs produits durant la Première Guerre mondiale par les principales parties engagées sur le front occidental. 152

Figure 46 : Grenade à manche allemande, modèle 1917. 157

Figure 47 : Sélection d'échantillons de poudres propulsives de cartouche de Mauser (calibre 7,92 mm, série « M », Allemagne) et de Lebel (calibre 8 mm, 8 x 50 R modèle 1886, série « Leb », France). Aperçu photographique. 159

Figure 48 : Sélection d'échantillons d'explosifs (per)chloratés. Aperçu photographique. 160

Figure 49 : Sélection d'échantillons d'explosifs nitrés nitratés de grenades à mancje et de projectiles d'artillerie de tranchée allemands. Aperçu photographique. 161

Figure 50 : Sélection d'échantillons d'explosifs de projectiles d'artillerie allemands. Aperçu photographique. 162

Figure 51 : Sélection d'échantillons d'explosifs de projectiles d'artillerie allemands. Aperçu photographique. 163

Figure 52 : Munitions anciennes dans les eaux de la Loue au sein du gouffre de Jardel (département du Doubs). Octobre 2000(à gauche), et localisation du point de prélèvement dans une munition de 75 mm volontairement déflagrée (à droite). 164

Figure 53 : Teneurs en chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-) des échantillons d'explosifs provenant de grenades à manche allemandes. 171

Figure 54 : Teneurs en [NH_4^+ + NO_3^- + NO_2^-] versus teneurs en ClO_4^-. 172

Figure 55 : Teneurs en [NH_4^+ + NO_3^- + NO_2^-] versus teneurs en ClO_4^- par catégorie de poudres et explosifs. 172

Figure 56 : Teneurs en chlorate et perchlorate dans des explosifs (per)chloratés collectés. 173

Figure 57 : Rapport [NH_4^+ / NO_3^-] (mmol/mmol) versus teneurs en NO_3^-. 174

Figure 58 : Analyses quantitatives de 13 échantillons d'explosifs (Envilytix GmbH). 176

Figure 59 : Signature isotopique ($\delta^{37}Cl$, $\Delta^{17}O$ et $\delta^{18}O$) de ClO_4^-. 186

Figure 60 : Signatures isotopiques $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 des différentes origines des nitrates naturels et synthétiques (NO3-Fertilizer). 190

Figure 61 : Résultats $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 des poudres et explosifs analysés. 192

Figure 62 : Résultats $D^{17}O$-NO_3 / $\delta^{18}O$-NO_3 des poudres et explosifs analysés. 193

Figure 63 : Signatures en $\delta^{15}N$-NO_3 par échantillon. 194

Figure 64 : Mécanismes contrôlant le devenir spatial et temporel des composés énergétiques. 201

Figure 65 : Biotransformation séquentielle du TNT. 204

Figure 66 : Champignon blanc délignifiants (aperçu photographique). 205

Figure 67 : Les eaux roses, marquées par la présence de sous-produits de phototransformation du TNT. 207

Figure 68 : Formules structurales de quelques composés issus de la phototransformation du TNT. Transformation biotique et abiotique des dinitrotoluènes. 207

Figure 69 : Formules structurales de l'aniline (en haut) et du catéchol (en bas). 208

Figure 70 : Formules structurales de la 1,2,3-tris-nitrooxy-propane ou (tri)nitroglycérine et du glycérol. 212

Figure 71 : Formules structurales de la cyanamide, cyanoguanidine, du carbazole et du tétrahydrocarbazole. 214

Figure 72 : Voie biochimique de réduction de l'ion perchlorate. 216

Figure 73 : Voie de dégradation des agents organo-arséniés Clark I et II. Clark I 219

Figure 74 : Coefficient de partage K_d en fonction de différents types de matrices (zone saturée) du site de Torgau-Elsig, Allemagne. 223

Figure 75 : Signatures chimiques des sols et des eaux souterraines au droit de l'ancien site de production de TNT à Stadtallendorf (Allemagne). 228

Figure 76 : Eugène Turpin, la mélinite et l'obus-torpille. 231

Figure 77 : Alfred Krupp et canon prussien de 4 avec chargement à la culasse. 233

Figure 78 : Exemples de pièces d'artillerie de campagne de la Première Guerre mondiale (mémorial de Verdun). 234

Figure 79 : Bataille de Lagarde (département de la Moselle.). 241

Figure 80 : Trains de mobilisé et le départ vers le front en 1914. Les deux camps partagent la même ferveur patriotique, les uns se voient à Paris, les autres à Berlin. 242

Figure 81 : Cartes patriotiques françaises de 1914 glorifiant (i) le canon de campagne de 75 mm (à droite). fer de lance de l'artillerie française dans la guerre de mouvement (ii) la ferveur de l'armée s'apprêtant à reproduire la campagne napoléonienne et la prise de Berlin en 1806 (à gauche). 242

Figure 82 : "Episode de combats dans les Vosges entre troupes coloniales françaises (Zouaves et Sénégalais) et les Uhlans". Carte postale. 243

Figure 83 : Colonel General Helmuth Johannes Ludwig Von Moltke (dit « Le jeune ») (1916) (1848-1916) 245

Figure 84 : Le Kronprinz dans la région de Verdun (non daté). 246

Figure 85 : Affiche en mémoire des opérations belges sur l'Yser, novembre 1914. 247

Figure 86 : Personnel d'une usine de production de munitions de Pamiers dans l'Ariège posant devant des exemplaires d'une vaste gamme de munitions de tout calibre. 254

Figure 87 : Rouleaux de fil de fer barbelé endommagé: les femmes produisent pendant la guerre des obus à la Saarbrücker = Firma Dingler & Karcher (Sarrebruck, Land de Sarre, Allemagne). 254

Figure 88 : Le Général de division Louis Henry Auguste Baquet (1858-1923) (à gauche) et le journaliste et sénateur de la Meuse (du 19 janvier 1908 au 10 janvier 1920) Charles Humbert (1866-1927) (à droite). 255

Figure 89 : Sentinelle dans les Vosges luttant contre un ennemi implacable, le froid. 259

Figure 90 : Position du front occidental fin 1914. 262

Figure 91 : Le Général Robert Nivelle à Souilly (département de la Meuse), le 9 novembre 1916. 267

Figure 92 :Le Général canadien Arthur Currie (à gauche) premier commandant national du corps expéditionnaire canadien, et Vimy (village en ruine) observé depuis la crête de Vimy après avoir été pris par les Canadiens, en avril 1917 (à droite). 269

Figure 93 : Trois entonnoirs de mine de Kruisstraat dans le secteur de Messines et le cratère Spanbroekmolen plus au nord, après l'attaque du 7 juin 1917 270

Figure 94 : Charles Harington (en 1915) (à gauche) et scène de la bataille de Pilckem Ridge. Artilleurs de la Royal Field Artillery tractant une pièce d'artillerie pour l'extraire de la boue. Nord d'Ypres. 271

Figure 95 : Front occidental en 1917 et les grandes offensives britanniques en Artois et en Flandre occidentale. 272

Figure 96 : Carte de la position du front et des grandes offensives allemandes du printemps 1918. 275

Figure 97 : Le Général John Pershing, commandant l'American Expeditionary Force (AEF) au Grand quartier général de Chaumont, 18 octobre 1918. 276

Figure 98 : La grande contre-offensive alliée. Evolution du front et de la position des armées entre le 25 septembre et le 11 novembre 1918. 278

Figure 99 : Sonagramme américain capté dans le secteur lorrain du Bois-le-Prêtre (département de la Meurthe-et-Moselle) le 11 novembre 1918. 281

Figure 100 : Population de la ville de Tournai (Belgique), pavoisant après avoir renversé une guérite de garde du poste frontière. 12 novembre 1918. 282

Figure 101 : Bombardement par des projectiles de tranchées d'une ligne de défense de fils de fer barbelés. 285

Figure 102 : Organisation des réseaux de mines de sapes étagés (systèmes allemands). 288

Figure 103 : Propagation de la détonation souterraine d'un fourneau de mine. 289

Figure 104 : Cliché exceptionnel d'une chambre de compression. 290

Figure 105 : Diversité des munitions d'artillerie allemande à chargement spécial et leur marquage distinctif de peinture. 296

Figure 106 : Obus d'artillerie chimique allemand de 105 mm type Croix bleue, a) Eléments de munitions collectés sur le terrain, b) Ecorché, c) Fioles d'arsine en verre vert découvertes sur le terrain. Site de destruction de munitions chimiques dit de la «Place à gaz » en forêt de Spincourt, Gremilly (département de la Meuse). 296

Figure 107 : Bombes d'aviation. Aperçus photographiques. 302

Figure 108 : Troupes d'assaut allemandes lors de l'offensive du printemps 1918. 305

Figure 109 : Le « Canon de Paris » 21/35 cm « Wilhelm Geschütze » de la forêt de Saint-Gobain et ses servants. 306

Figure 110 : Colonel Georg Bruchmüller (1863-1948). Rheinisches Fußartillerie-Regiment Nr. 8 von Preußen. 307

Figure 111 : Nombre de coups tirés par jour par le canon de campagne français de 75 mm entre décembre 1916 et l'armistice. 310

Figure 112 : Evolution du nombre de pièces d'artillerie de campagne et lourde entre 1914 et 1918 dans les parcs français, allemands et britanniques. 311

Figure 113 : Production française d'obus de 75 mm encartouchés durant la Première Guerre mondiale. Production décadaire. *314*

Figure 114 : Obus français de 105 mm chargé durant la Première Guerre mondiale. Production décadaire. *314*

Figure 115 : Effacement sous les obus du village de Messines, Flandre occidentale, Belgique. *320*

Figure 116 : Régimes de fonctionnement des munitions tirées. *325*

Figure 117 : Trajectoires souterraines des UXOs. *329*

Figure 118 : Un obus de 380 mm tirés (ceinture rayée) et non explosés exposés sous différents angles par des photographes allemands. *330*

Figure 119 : Obus allemand de 380 mm non explosé extrait du sol *331*

Figure 120 : a) Obus d'artillerie de campagne non explosé et fiché dans un tronc d'arbre. b) Une bombe d'aviation constituée d'une bombe de tranchée allemande (« Mine ») non explosée, exhibée devant la statue de Jeanne d'Arc, au pied de laquelle l'engin est tombé. c) Obus français tirés et non explosés en Alsace. *332*

Figure 121 : Obus d'artillerie lourde déflagré (en haut) lors de sa découverte sur le terrain et culot (en bas) de projectile encore partiellement chargé d'explosif (Vimy Thelus, département du Pas-de-Calais). *335*

Figure 122 : Tentative de neutralisation d'un obus non explosé ottoman par des soldats serbes à Adrianople (actuelle Edirne en Turquie européenne) lors de la première guerre balkanique (1912-1913). *339*

Figure 123 : Restes de guerre en Crimée. 1856.. ..... *340*

Figure 124 :Civils glaneurs d'obus encartouchés allemands de 77 mm abandonnés dans un champ après la première bataille de la Marne. Non localisé. *341*

Figure 125 : Fauchage des foins par les soldats cultivateurs *343*

Figure 126 : Colonne de Prisonniers de Guerre (PG) allemands portant au cimetière (provisoire ?) des soldats tombés au combat. *348*

Figure 127 : Ecriteau à l'entrée d'un dépôt de récupération britannique « Il est pour le « Fritz ». Il a été fait pour lui. Alors pourquoi le laisser reposer dans la boue, prends-le et amènes le au dépôt de récupération » Langemarck (Langemark-Poelkapelle). 8 octobre 1917 . ..... *360*

Figure 128 : Préparation d'un dispositif d'amorçage d'une fourneau d'éclatement sous tertre à l'Ecole Centrale de la Pyrotechnie de Bourges en novembre 1890. ..... *367*

Figure 129 : Planches photographiques de scènes de destructions d'engins de tranchée français par du personnel de l'armée française à proximité de Crugny (département de la Marne) en octobre 1917. ..... *368*

Figure 130 : Préparation d'une destruction par pétardement d'un obus isolé de gros calibre non explosé par des sapeurs allemands.. ..... *369*

Figure 131 : Opérations de démontage partiel des coups complets britanniques endommagés lors de l'explosion du dépôt de Wanquetin (département du Pas-de-Calais). *371*

Figure 132 : Devenir des munitions récupérées durant la Première Guerre mondiale par le Service de la récupération (France) et les Salvage (USA, Grande-Bretagne). *374*

Figure 133 : Projectiles lourds non tirés abandonnés sur le champ de bataille de Verdun (département de la Meuse) parmi les barbelés, queues de cochon et tôles cintrées. 379

Figure 134 : Projectiles allemands et leurs paniers en osier abandonnés en désordre. Visite de Sir Edward Kemp, Ministre des Forces militaires d'outre-mer du Canada à compter d'octobre 1917..... 379

Figure 135 : Ruines de la gare de Fourmies (département du Nord) après l'explosion de wagons chargés de munitions allemandes lors de la retraite allemande de 1918. 383

Figure 136 : Découverte d'un dépôt enfouis de 1 500 obus datant de la Première Guerre mondiale à Levergies dans l'Aisne en juin 2021. 385

Figure 137 : Dépôt de munitions ex-allemandes « Ammunition Reclamation Depot N° 1 ». Les bâtiments à gauche de la route sont des abris. Mauvages, Meuse, France.12 décembre 1918. 386

Figure 138 : Dépôt de munitions de gros calibre ex-allemands encore conditionnées dans leurs nasses en osier, abandonné dans les bois à Avocourt, département de la Meuse (cliché d'août 1919)..... 387

Figure 139: Obus chimiques allemands de gros calibre (possiblement 210 mm) abandonnés par les Allemands au nord d'une route à Bellefontaine (province du Luxembourg, Wallonie, Belgique) 389

Figure 140 : Carte postale. Etang de La Motte vidé à Liessies, département du Nord 389

Figure 141 : Dépôt d'obus non tirés, non amorcés (de 150 ou 155 mm) abandonné au bord d'un chemin à Neuville-sous-Margival (département de l'Aisne)..... 393

Figure 142 : Fillette face à un empilement d'obus non tirés (possiblement de 210 mm) abandonnés à Chavignon (département de l'Aisne). Année 1920. 393

Figure 143 : Caisses en bois renfermant des pains d'explosifs de sureté allemands de 1 kilogramme de Westfalite et Carbonite emballés dans des papiers paraffinés découverts dans un système de galerie de mine au Bois des Chevaliers (département de la Meuse). 398

Figure 144 : Prévisions des approvisionnement de l'AEF en munitions (au 8 octobre 1918) 401

Figure 145 : Distribution des anciens dépôts de munitions ex-allemandes en 1919 en Alsace-Lorraine et tracé de la ligne de front stabilisée (1915-1916). 407

Figure 146 : Dépôt de munitions de Hédival Puttigny (département de la Moselle). site du « Gros Max » de Hampont 408

Figure 147 : Localisation et organisation du dépôt de munitions allemand de la forêt de la Hardt (Hartwaldlager). 410

Figure 148 : Organisation des stockages de munitions allemands du dépôt de la forêt de la Hardt (Hartwaldlager) pour chacun des quatre sous-secteurs le constituant. 411

Figure 149 : Localisation du dépôt du MA3 en forêt d'Illkirch (commune d'Illkirch-Graffenstaden, département du Bas-Rhin). 412

Figure 150 : Le dépôt de munitions du Bois de Lorraine (département du Bas-Rhin) a) état 1921 et b) état 1929, montrant des îlots de munitions françaises et de vastes entonnoirs ouverts par les explosions accidentelles du début des années 20. 414

Figure 151 : Dépôt de munitions ex-allemandes (en bleu) du bois de l'hôpital au sud-sud-est de Metz (département de la Moselle). En pointillés rouge, l'emplacement prévu pour un dépôt de munitions françaises. En pointillé orange, l'emplacement de deux terrains d'explosion ; état 1922..... 416

Figure 152 : Munitions à regrouper et à détruire en France en date du 1er février 1922. 420

Figure 153 : Visite du site du Schratzmaennele, dans le secteur du Linge, par une classe de la vallée de Munster au printemps 1919. ..... *427*

Figure 154 : Epaves d'un train de munitions après son explosion en pleine voie entre Anor et Mondrepuis (Avesnois, département du Nord) en 1919. ..... *429*

Figure 155 : Picratation à l'œil d'un obus chimique de 155 mm. *436*

Figure 156 : Rare aperçu photographique panoramique des travaux de remise en état des sols par le STPU dans le soissonnais en 1919. ..... *447*

Figure 157 : Equipes s'affairant aux travaux de remise en état des sols sur l'ancien champ de bataille du Linge (positions françaises du Hurlin). *448*

Figure 158 : Découpage du territoire national en région militaires (en 1914). *464*

Figure 159 : Localisation des centres de rassemblement des munitions chimiques des 2e et 6e Région militaires en forêt et canton de Spincourt (département de la Meuse). *468*

Figure 160 : Orthophoto du dépôt de munitions et de matériel allemand de Rampont / Muzeray en juillet 1918. ..... *469*

Figure 161. Le Général Régnier, Commandant la 6e Région militaire. *470*

Figure 162 : Affiche bilingue pour la prévention des risques liés aux engins de guerre ancien abandonnés sur les lieux de tourisme mémoriel en Haute-Alsace. Commissariat Général de la République, Strasbourg, le 15 avril 1921. ..... *474*

Figure 163 : Civils contemplant une affiche pour la prévention contre les dangers des engins de mort. Les enfants, victimes privilégiées de engins non explosés, sont clairement visés par cette affiche. « Enfants ! ne touchez pas aux engins de guerre. C'est la Mort qui vous tend un piège » Vansassenbroeck, Belgique. 25 mars 1919. ..... *474*

Figure 164 : Eclatement volontaire de grenades dans une dépression remplie d'eau (capture d'écran). *477*

Figure 165 : Détonation du tas de munitions à Tahure (Somme-Py, département de la Marne). Capture d'écran. *480*

Figure 166 : Préparation de fourneaux d'éclatement à Tahure (Somme-Py, département de la Marne). Munitions non détonées dispersées après avoir été projetée par l'explosion des fourneaux (en bas) Capture d'écran. *481*

Figure 167 : Préparation de fourneaux d'éclatement par des artificier civils (non daté, vers 1919) (a). Une amorce reliée à une mèche lente ; on détonant est placée à l'œil ogival des obus désamorcés à détruire (b). *484*

Figure 168 :Les deux terrains d'explosion de Confrémeaux (département de l'Aisne). *485*

Figure 169 : Equipe d'artificiers français soldats du 33e d'Arras en mission de désobusage posant devant un empilement d'obus allemands en mai 1919 à Frais-Marais, au nord de Douai (département du Nord). A noter le soldat en bas à droite portant l'uniforme (Italiens ?). Cinq d'entre eux arborent une fourragère. *485*

Figure 170 : Vaste champ d'éclatement de Vaudoncourt (département de la Meuse). *486*

Figure 171 : Terrains d'éclatement associé aux anciens dépôts ex-allemands à proximité des anciens ateliers de chargement avancés de munitions chimiques de Mancieulles-les-Briey (département de la Meurthe-et-Moselle). *487*

Figure 172 : Un aviateur américain pose tenant l'ogive d'un projectile de 420 mm d'obusier « Grosse Bertha ». Mémorial Romagne-sous-Montfaucon.. 490

Figure 173 : Préparation d'un fourneau de pétardement par la Reclamation and Demolition Department, 1st Army. 13 janvier 1919. Romagne-sous-Montfaucon (département de la Meuse)..... 492

Figure 174 : Pétardement US du dépôt de munitions ex-allemande de Lissey (département de la Meuse). 492

Figure 175 : Découpage des 1er, 2e et 6e Régions militaires pour l'attribution avant 1929 des marchés des « Régions Libérées » et des marchés du « Temps de Guerre ». 516

Figure 176 : Evolution des tonnages de Restes Explosifs de Guerre détruit dans le département de la Meuse entre 1923 et 1935..... 521

Figure 177 : a) Vue d'ensemble du site industriel de désobusage et de ferraillage des matériaux issus du front. Site Savot Frères & Cie, route de Bouzincourt à Albert (département de la Somme), b) Monsieur Savot, directeur des chantiers de désobusage d'Albert dans son bureau avec quelques échantillons de ses découvertes. Monsieur Savot est un blessé de guerre, et directeur de l'entreprise de désobusage et de récupération Savot Frères & Cie. Vers 1936..... 523

Figure 178 : Munitions (75 mm, 150 mm) non explosées et fusées à l'affleurement dans le Ravin du Hélly, Douaumont. 526

Figure 179 : 1936-1937. a) Découverte d'un obus tiré et non explosés de 380 mm allemand dans un fossé, b) Récupération d'obus dans les anciennes tranchées, et c) Une équipe de récupérateurs sonde et fouille l'ancienne Zone rouge fraichement replantée de conifères à Albert (département de la Somme). 529

Figure 180 : Extrait du Figaro du 4 mars 1938..... 531

Figure 181 : Fusils et mitrailleuses allemandes perquisitionnées. 531

Figure 182 : Alexandre Millerand (en 1914). Commissaire Général de la République à Strasbourg de mars 1919 à janvier 1920..... 540

Figure 183 : Gabriel Alapetite vers 1900..... 541

Figure 184 : Tranchée allemande coffrée sur l'Ochsenfeld (commune d'Aspach-le-Haut) avec banquette de tir et créneaux. L'ennui et la lassitude sont manifestes. Non daté..... 543

Figure 185 : Munitions françaises tirées et non éclatées affleurant en plein champs en Haute-Alsace vers 1915..... 544

Figure 186 : Extrait du Journal de la Manche et de la Basse-Normandie du 4 janvier 1919..... 545

Figure 187 : Cimetière provisoire allemand, près du monument des Chasseurs. Document Comité du Monument national du Hartmannswillerkopf. Tourisme mémoriel dans les années 20 à l'Hartmannswillerkopf. 545

Figure 188 : Coupure de presse relatant l'accident survenu en avril 1921 à l'Hartmannswillerkopf, annotée par le Haut-Commissaire de la République, Alexandre Millerand. 546

Figure 189 : Projectile pré-fragmenté du lance-grenade léger allemand Kleiner Priester non éclaté et projeté au-dessus des lèvres d'un entonnoir de destruction à Barenton-Bugny, au nord-est de Laon (département de l'Aisne). 551

Figure 190 : Extrait du Le Nouvelliste d'Alsace du 10 octobre 1923..... 551

Figure 191 : Auguste Wicky à gauche en présence de Charles De Gaulle à la libération de Mulhouse, le 21 novembre 1944. ..... *566*

Figure 192 : Georges Weill, le Général Auguste Édouard Hirschauer, André Lefèvre, et Louis Barthou, Ministres de la Guerre. *573*

Figure 193 : Le Général de Division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz. *576*

Figure 194 : Explosions accidentelles au Bois de Lorraine. Coupures de presse a) Le Journal des débats politiques et littéraires du 19 juillet 1920 au sujet de l'explosion du 16 juillet 1920, b) c) L'Intransigeant du 7 mai 1921 au sujet de l'explosion du 28 avril 1921, d) Article germanophone au sujet de l'explosion du 28 avril 1921. Source non renseignées, e) La République n° 117 du 29 avril 1921 au sujet de l'explosion du 28 avril 1921. ..... *582*

Figure 195 : Evolution des tonnages des munitions ex-allemandes démolies sur le Territoire de Lorraine *584*

Figure 196 : Tournage de projectiles à ailettes de 240 mm dans une usine de l'Isère (Livet-Gabet)(1915). *598*

Figure 197 : Habitants de Grenoble observant depuis un pont sur l'Isère le panache de fumée généré par la détonation accidentelle d'explosifs sur le polygone de tir le 18 juin 1918. ..... *601*

Figure 198 : Entonnoirs de pétardement du polygone de tir de Grenoble en 1926. ..... *601*

Figure 199 : Opération déchargement de munitions et de destruction de poudres propulsives à l'ERGMu de Mézidon-Canon (département du Calvados). Aperçus photographiques (non daté). a) Préparation, b) Déchargement des cartouches à obus explosifs de 76 m/m chargés en Schneidérite (par grattage et brûlage). c) Tranchée de brûlage desservie par une voie étroite Decauville, d) Brûlage de poudre propulsives. *604*

Figure 200 : Extrait Le Temps, 28 mai 1923. ..... *605*

Figure 201 : Rapport de l'Officier d'administration Klauss, Chef du Service des Munitions du PAR de Poitiers sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière La Désirée située à Avrillé. Le 20 mars 1924. Schéma du massif de munitions. *606*

Figure 202 : Nombre et nature des projectiles, signaux et artifices visés par les démolitions par la Base Française d'Italie en janvier 1919. ..... *611*

Figure 203 : La rencontre de deux intrépides britanniques. Francis Norman Pickett se tient à gauche de son chien. Cigarette à la main. A sa gauche, le Capitaine Worsley, commandant de l'expédition polaire Algarson. Non daté. *614*

Figure 204 : Michael Kostevitch sous l'uniforme de l'armée impériale russe (non daté). *615*

Figure 205 : Le dépôt de munition de Trélon, vers 1920. a) quais de déchargement b) piles de munitions de gros calibre (210 mm) en sous-bois. *620*

Figure 206 : Un couple et leurs chiens posant sur une bombe d'aviation allemande de 1 200 kg, la plus lourde des bombes de la Grande Guerre. Usine de désobusage C-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils à Trélon. Vers 1920. ..... *621*

Figure 207 : Un jeune homme bien apprêté pose avec une posture provoquante devant des amas de munitions désordonnés du dépôt forestier de munitions de Trélon. Non daté. *621*

208 : Les parcs à munition nord (« Bois l'Abbé » à Liessies) et sud (« Parc Jeannette » à Trélon). Cartographie des vestiges des anciens dépôts et de l'usine F.N. Pickett & Fils C-Factory. *622*

Figure 209 : Cartographie LiDAR du parc à munitions sud (Parc Jeannette) à Trélon (BRGM, 2016). .. *623*

Figure 210 : Extrait du Journal de Fourmies, 27 novembre 1921. 625

Figure 211 : Une équipe majoritairement féminine pose au sein d'un atelier de désamorçage de l'usine de F.N. Pickett & Fils C-Factory à Trélon. 631

Figure 212 : Une équipe de manœuvres pose durant une opération de préparation de tranchées de brûlage d'obus au lieudit « Bois Jeannette ». Usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon, département du Nord. 631

Figure 213 : Les usines et implantations de l'entreprise F.N. Pickett & Fils. 636

Figure 214 : Préparation d'une opération de brûlage d'obus de gros calibre ouvert au culot et de projectiles d'artillerie de campagne en rangées, sur la droite. Usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils de Poelkapelle (Westroozebeke). 640

Figure 215 : Préparation de trois tranchées de brûlage d'obus de gros calibre ouverts au culot. Usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils de Poelkapellen (Westroozebeke). Belgique. Non daté (vers 1921). 640

Figure 216 : Structure en « U » merlonnée à proximité du corps de ferme de la Gélinerie. 645

Figure 217 : Extraits du Le Petit Parisien (Paris), 10 mars 1922, et du Le Matin (Paris. 1884). 21 avril 1922. 654

Figure 219 : Avance française et alliée sur le Rhin, 17 novembre-14 décembre 1918. 662

Figure 220 : Géolocalisation des principaux sites de destruction de munitions en Allemagne. 667

Figure 221 : Paysage apocalyptique. Aperçu photographique du site de Breloh après l'explosion catastrophique du 24 octobre 1919. 669

Figure 222 : Evolution du nombre d'installation d'élimination de munition dans l'Allemagne non occupée sous le régime du Syndikatsvertrage. 670

Figure 223 : Scellement d'un bouchon à l'orifice de remplissage d'un projectile chimique de gros calibre à Breloh. 671

Figure 224 : Préparation d'un fourneau d'éclatement ou d'une tranchée de brûlage de projectiles brisés à Breloh. Possiblement après l'explosion accidentelle du 24 octobre 1919. 674

Figure 225 : Préparation d'un brûlage en tas de projectiles à Breloh. 674

Figure 226 : a) Personnel civil masculin et féminin vraisemblablement en train de reconditionner des fusées dotées de leur gaines d'éclatement, b), c), d) personnel civil et militaire procédant au désamorçage d'obus de gros calibre par dévissage de l'ensemble fusée + gaine, e), f) soldats britanniques procédant au brûlage en plein air (Open Burning, OB) de fagots de propulseurs nitrocellulosé. 8 avril 1919. 676

Figure 227 : Terrain de pétardement d'Ochtendung (Rhénanie-Westphalie).. 679

Figure 228 : Ce fourneau à Ochtendung est notamment chargé de bombes sphériques de Zeppelin et de caisses de munitions en bois. 679

Figure 229 : Vue photographique de l'usine d'Hallschlag après le sinistre du 29 mai 1920. 682

Figure 230 : Devenir des surplus de guerre et des munitions en excès, obsolètes et hors service datant de la Première Guerre mondiale 697

Figure 231 : Atelier de déchargement par fusion des obus explosifs de la J-Factory à Zeneghem (département du Pas-de-Calais) vers 1921. A noter les écriteaux rappelant les consignes de sécurité en anglais et langues étrangères. 700

Figure 232 : Une femme affairée à percuter manuellement des amorces. Usine F.N. Pickett & Fils de Moliens (département de l'Oise) 701

Figure 233 : Installations en tôle cintrée à l'usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (département du Nord)..... 707

Figure 234: Vue générale des baraquements provisoires en bois des personnels employés à l'usine J-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils à Zeneghem (département du Pas-de-Calais)..... 708

Figure 235 : Vue générale de l'usine D-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais). 708

Figure 236 : Vue de l'usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais)..... 709

Figure 237 : Acheminement, rassemblement et stockage temporaire des munitions anciennes dans le centre de désobusage Savot Frères & Cie à Coucy-le-Château (département de l'Aisne). Vers 1935.. 711

Figure 238 : Compactage par écrasseent sous pilon des cartouches en laiton. Usine F.N. Pickett & Fils F-Factory de Moliens Abancourt (département de l'Oise)..... 714

Figure 239 : Enchaînement de tâches pour le vidage et la destruction de projectiles à chargement explosif..... 715

Figure 240 : Organisation d'un chantier de destruction de munitions dans l'Oise, dans l'entre-deux-guerres..... 716

Figure 241 : Obus chimiques allemands de 105 mm pour obusier léger de campagne montrant les anneaux blancs marquant les joints d'étanchéité en ciment magnésien, trahissant la présence d'un chargement chimique liquide..... 718

Figure 242 : Mise en scène d'une opération de désamorçage d'obus chimiques de gros calibre. Usine Clere & Schwander de Rampont, à Muzeray, département de la Meuse. Collection particulière, E. Hanotin. 719

Figure 243 : Cellule merlonnée de désamorçage (« cubic hall »). Usine F.N. Pickett & Fils D-Factory de Dannes Camier (département du Pas-de Calais). Dessin d'Etienne Lemaire..... 719

Figure 244 : Vue recto verso. Désamorçage par dévissage de la fusée de culot d'un obus chimique de 210 mm, très possiblement à chargement liquide (vue la grille et le réservoir sous l'étau). Usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils de Trélon, département du Nord. Non daté..... 720

Figure 245 : Fours de grillage de fusées d'artillerie dotés de cheminées d'évacuation et de dispersion des fumées (chargées en mercure). Au premier plan, un tas de fusées grillées. Usine Savot Frères & Cie d'Albert (département de la Somme). vers 1935..... 722

Figure 246 : Opérations de déceinturage au marteau et burin (premier plan) et vidage à l'eau chaude (à l'arrière-plan). Usine F.N. Pickett & Fils E-Factory d'Audruicq (département du Pas-de-Calais)..... 724

Figure 247 : Rampe de vidage d'obus explosifs de gros calibre. Usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais). 726

Figure 248 : Tranchée (a) et opération de brûlage (b) de poudres propulsives à l'ERGMu de Mézidon - Canon (département du Calvados). Probablement vers 1920, non date..... 728

Figure 249 : Brûlage d'explosif ou de boues issues du vidage des obus explosifs sur la plage (vraisemblablement l'estran) à Dannes Camiers. Usine D-Factory) F.N. Pickett & Fils. 1920-1922..... 729

Figure 250 : Panache de fumée issu d'un foyer de brûlage à l'usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke (Belgique). Non daté. Noter au premier plan les chandelles d'arbres décapités par les bombardements durant la guerre 730

Figure 251 : Opération de brûlage de F.N. Pickett & Fils. Disposition de tranchées de brûlage..... 732

Figure 252 : Tranchées de brûlage de l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). 1922.. 733

Figure 253 : Tranchées de brûlage de l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). 1922. 733

Figure 254 : Dispositif de vidage d'obus chimiques à chargement liquide par aspiration sous vide breveté par F.N. Pickett & Fils..... 737

Figure 255 : Perçage d'obus chimiques de gros calibre par des personnels protégés. Ateliers de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt, canton de Spincourt, département de la Meuse. 739

Figure 256 : Vidage d'obus chimiques à Ypérite. Usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray, département de la Meuse. A droite un personnage en costume sans protection. Il s'agit possiblement d'une mise en scène à des fins publicitaires..... 739

Figure 257 : Obus chimique britannique de 115 mm à double diaphragme. Atelier de destruction Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt, département de la Meuse. 740

Figure 258 : Broyage par pilonnage au maillet de bois d'explosifs pour leur reconditionnement en caisse. Usine F.N. Pickett & Fils, D-Factory) de Dannes Camiers..... 743

Figure 259: Cristallisoir pour la récupération du nitrate d'ammonium depuis les effluents issus du déchargement d'obus explosifs à Amatol. Usine F.N. Pickett & Fils D-Factory de Dannes Camiers..... 743

Figure 260 : « Décapitation » A la masse de l'ogive d'un obus à balles pour la récupération des billes de plomb. Usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils à Dannes Camiers, à gauche et Usine F-Factory à Moliens, à droite 744

Figure 261 : Distribution géographique des sites de destruction de munitions de la Première Guerre mondiale inventoriés par le BRGM (état décembre 2018)..... 753

Figure 262 : Carte de la distribution des sites de destruction de munitions de la Première Guerre mondiale en France métropolitaine..... 755

Figure 263 : Modalités d'élimination des engins de guerre de la Première Guerre mondiale. 756

Figure 264 : Vue partielle du terrain d'éclatement de Fampoux (département du Pas-de-Calais) et son effacement du paysage avec le temps..... 763

Figure 265 : UXO au moment de leur découverte. Aperçu photographique..... 799

Figure 266 : Particules de TNT imbrulées collectées autour d'un point d'impact d'un projectile de 155 mm observées à la loupe binoculaire (tiré de Taylor et al., (2004))..... 803

Figure 267 : A gauche, fragments grossiers centimétriques (chunks) de TNT récoltés à la surface du sol sur une surface de 10 x 10 m sur un site de destruction de munitions par éclatement (pétardement avec détonations de bas-ordre, à Fort Bliss, Nouveau Mexique, USA). A droite, particules millimétriques de TNT (flakes) issus de sols d'un terrain de pétardement..... 805

Figure 268 : Fragments de munitions d'engins partiellement détonés (détonation de bas-ordre) observés au droit des anciens champs de bataille de la Première Guerre mondiale..... 806

Figure 269 : Cailloutis de calcaire corallien oxfordien finement fragmentés mêlé à une forte densité d'éclats et esquilles métalliques sur un secteur intensément bombardé du Ravin du Helly, Douaumont, champ de bataille de Verdun (département de la Meuse). 808

Figure 270 : Ogive d'une munition britannique montrant l'action de la corrosion avec écaillage du marquage signalétique (La Boisselle, département de la Somme). 809

Figure 271 : Aperçu photographique de munitions corrodées de la Seconde Guerre mondiale. 811

Figure 272 : Exemples d'effets de la corrosion accélérée par bimétallisme (corrosion électrolytique) sur des projectiles chimiques allemands de la Première Guerre mondiale. 811

Figure 273 : Grenades à manche allemandes découvertes à Vauquois, montrant des parois en acier fines profondément corrodées. 815

Figure 274 : Evolution des particules résiduelles dans les sols sous l'effet de la dissolution..... 818

Figure 275 : Tunnel de détonation ; installation temporaire de destruction par éclatement. 829

Figure 276 : Formules structurales des RDX et HMX et biodégradation séquentielle du RDX. 831

Figure 277 : Constitution d'un échantillon de type mélange suivant une configuration en étoile des prises unitaires. 832

Figure 278 : Fourneaux de destruction par Open Detonation partiellement détonés. Site du Ravin du Chaufour, Douaumont (département de la Meuse). Aperçu photographique. 835

Figure 279: Panache d'ions perchlorate en lien avec une source de pollution ponctuelle formée par un entonnoir de destruction de munitions. 838

Figure 280 : Projections de fragments d'explosifs non détoné en combustion lors de l'éclatement d'un fourneau de destruction. Non daté. Non localisé. 841

Figure 281 : Typologie des entonnoirs d'explosion. a) Vaste entonnoir isolé de Juniville (département des Ardennes), b) Champ d'explosion (champ 2) d'entonnoirs juxtaposés de Barenton-Bugny (département de l'Aisne), c) Entonnoirs coalescents à Berry-au-Bac à l'est de la Cote 108 (département de l'Aisne) et d) Entonnoirs emboîtés à Barenton-Bugny (champ 1) (département de l'Aisne). 846

Figure 282 : Terrain d'explosion de Saint-Erme-Outre-et-Ramecourt (département de l'Aisne). Photographie aérienne de 1922. Extrait. 847

Figure 283 : Catégories de champs d'explosion selon les dimensions et le tonnage détruit proposé par le LfU du Land de Bavière. 848
Figure 284 Champs d'explosion de Fampoux et Monchy-le-Preux (département du Pas-de-Calais) (1947). Ce vaste terrain d'explosion a été exploité jusqu'en 1941 par l'industriel Léon Berge pour la démolition des engins de 1914-1918. Il aurait été exploité postérieurement possiblement pour éliminer les REG de la Seconde Guerre mondiale. Cette photographie aérienne montre clairement le champ actif tout comme les marques des anciennes activités de l'entre-deux-guerres. A noter la dispersion des projections selon la direction des vents dominants. 848

Figure 285 : Organisation d'un entonnoir d'éclatement et distribution des Restes Explosifs de Guerre (plan). 850

Figure 286 : Organisation d'un entonnoir d'éclatement et distribution des Restes Explosifs de Guerre (coupes schématiques séquencées). 851

Figure 287 : Matériaux de comblement d'entonnoirs d'éclatement. Aperçus photographiques.. 852

Figure 288 : Localisation des trois principales entités du complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (nord du département de la Meuse). *854*

Figure 289 : Projectiles découverts dans le fossé agricole recoupant le champ d'explosion secondaire de Spincourt (source : Hubé, D., juillet 2016). Vue aérienne de 1922 du terrain d'explosion (photo en bas à gauche, largeur de la prise de vue, environ 130 m). *854*

Figure 290 : Organisation du complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (département de la Meuse). Au centre le terrain d'explosion de Noire Fontaine et au sud celui de Vaudoncourt Loison. Extrait de Hubé (2017). *855*

Figure 291 : Projectiles et fragments de projectiles observés au droit du terrain d'éclatement Clere & Schwander de Loison Vaudoncourt, canton de Spincourt (département de la Meuse)(2015) *858*

Figure 292 : Charriot de prospection géomagnétique. Aperçu photographique (BRGM, 2016). *859*

Figure 293 : Cartographie géomagnétique du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison (canton de Spincourt, département de la Meuse) de septembre 2015 et aperçus orthophotographiques de 1922 et 1987. ..... *861*

Figure 294 : Schéma conceptuel de transfert du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison. *868*

Figure 295 : Terrain d'explosion de Noire Fontaine à Vaudoncourt. Aperçus photographiques (2015, 2016). Complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (département de la Meuse), ... *870*

Figure 296 : Répartitions des matières issues des engins de guerre susceptible d'influencer la qualité des eaux souterraines, au droit et aux abords des terrains d'explosion. *876*

Figure 297 : Localisation des sites de brûlage étudiés dans le cadre de la présente recherche. *884*

Figure 298 : Prospection géomagnétique effectuée en février 2016 à Noire Fontaine. Traction du charriot par un opérateur géophysicien. Aperçu photographique. (BRGM). *890*

Figure 299 : Adaptation du charriot d'acquisition par l'usage d'un mototracteur chenillé. (BRGM). *890*

Figure 300 : Zone d'exclusion lors des travaux de creusement des fosses de sondage à la pelle mécanique en février 2018 au droit du site de l'ancienne usine de désobusage Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). *892*

Figure 301 : Sondages à la pelle mécanique au droit des terrains de brûlage de la « Place à gaz » (Gremilly) et de Noire Fontaine (Vaudoncourt), département de la Meuse. Mesures de protection individuelles. Aperçus photographiques. *892*

Figure 302 : Disposition concentriques des associations végétales sur le pourtour de la « Place à gaz » (d'après Bausinger (2007)). *899*

Figure 303 : Burning-grounds, aperçus photographique *902*

Figure 304 : Phytotoxicité des résidus de brûlage, aperçus photographiques *903*

Figure 305 : Marquage de la végétation (cultures) par la pollution des sols au droit de l'ancienne aire de brûlage de l'usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke / Poelkapelle (Flandre occidentale, Belgique) *904*

Figure 306 : Zones incultes (en violet) reportées dans le cadre au droit du site de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (en date de 1997). *905*

Figure 307 : Tranchée de brûlage hors sol au Parc Jeannette (C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (Nord) bordée par un mur pare souffle fait d'obus déchargés. Non daté, possiblement vers 1921-1922. 907

Figure 308 : Systèmes de tranchées de brûlage mis en évidence sur photographie aérienne ancienne (1922) et par exploration géomagnétique au sol (BRGM, février 2016) au droit des anciennes installations de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt). 909

Figure 309 : Systèmes de tranchées de brûlage (anomalie A7) mis en évidence au droit de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont (commune de Muzeray) par exploration géomagnétique au sol (BRGM, septembre 2016). 910

Figure 310 : Systèmes de tranchées de brûlage au droit de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont. Aperçu de photographie aérienne ancienne (1922). 910

Figure 311 : Aire de brûlage de l'usine Clere et Schwander de Rampont. Préparation d'une tranchée de brûlage d'obus d'artillerie de campagne. Orthophotographie de 1922 et cliché au sol (non daté)..... 911

Figure 312 : Tranchée de brûlage recoupée par le sondage à la pelle mécanique NF-PM-5 au droit d'un des systèmes de tranchées de brûlage du site de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt, Meuse) 912

Figure 313 : Fosse ou puits (d) comblé de résidus cendreux, scories (a) et macroéléments métalliques (b,c). Sondages à la pelle mécanique au droit du site de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (Vaudoncourt) (février 2018). 913

Figure 314 : Le site de brûlage de munitions chimiques de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse). Localisation et aperçu photographique satellitaire. 914

Figure 315 : Aires de brûlage et dépôts de résidus de combustion de la « Place à gaz », comme de Gremilly (département de la Meuse) (octobre 2014). 915

Figure 316 : Résidus de brûlage de matériels explosifs et toxiques ex-allemands. 918

Figure 317 : a), b) Zooms sur les résidus jonchant le Burning Ground du Parc Jeannette n°2, Trélon de la C-Factory de F.N. Pickett & Fils. Des rondelles, fragments de ressorts, masselottes d'éléments de fusées sont reconnaissables, c) restes de grenades à manches allemandes partiellement calcinées et fusionnées en masse par une résine de composition et d'origine inconnue, d), e) résidus de brûlage d'engins allemands à Zweedorf. En e) des goulots de fioles d'arsines. 919

Figure 318 : Observations des grains constituant les résidus de brûlage de la « Place à gaz » à la binoculaire 923

Figure 319 : Distributions des teneurs en chrome (Cr) des échantillons analysés..... 928

Figure 320 : Distributions des teneurs en nickel (Ni) des échantillons analysés. 929

Figure 321 : Distributions des teneurs en arsenic dans les sols et les résidus de brûlage (en haut). Idem mais sans les terrains de brûlage de la « Place à gaz » (en bas)..... 932

Figure 322 : Distribution des teneurs en ETM (box plots) pour le second ensemble de données à quatre variables (As, Cd, Pb, Zn). 934

Figure 323 : Distribution des teneurs (box-plots) pour le premier ensemble de données à sept variables (Cu, Hg, Sn)..... 935

Figure 324 : Analyse en Composante Principale (ACP) centrée et normée sur l'ensemble 2 de données à 4 variables (As, Zn, Pb, Cd). Biplot de corrélation. 936

Figure 325 : Analyse en Composante Principale (ACP) centrée et normée sur l'ensemble de données à 7 variables (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sn, Zn) (biplot de corrélation). 937

Figure 326 : Relations entre les teneurs en zinc et en cuivre dans les sols. 939

Figure 327 : Relations entre les teneurs en zinc et en arsenic. 940

Figure 328 : Relations entre les teneurs en plomb et en arsenic. 941

Figure 329 : Relations entre teneurs en zinc et en cadmium. 942

Figure 330 : Eléments centimétriques d'explosifs (chunks) sur les sols du site Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) à gauche et élément centimétrique isolé de TNT sur les sols du site Clere & Schwander de Rampont (Muzeray). 945

Figure 331 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols du terrain de brûlage de l'usine E-Factory de F.N. Pickett & Fils d'Audruicq (département du Pas-de-Calais). 953

Figure 332 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage des sites de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt) et Rampont (commune de Muzeray) dans le canton de Spincourt (département de la Meuse). 954

Figure 333 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage du terrain de brûlage F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz », commune de Gremilly (département de la Meuse). 955

Figure 334 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage des sites de désobusage F.N. Pickett & Fils de Westroozebeke (B-Factory, Belgique) et du Bois Brûlé de Conteville (département de la Somme). 956

Figure 335 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage de site de désobusage F.N. Pickett & Fils de l'usine C-Factory de Trélon et Liessies (département du Nord). 957

Figure 336 : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques arséniés et composés arséniés phénylés produits par la décomposition thermique des chlorures et cyanures de diphénylarsines. 961

Figure 337 : Formules structurales des bromures de benzyle et de xylyle et de la bromacétone. 962

Figure 338 : Formules structurales des PolyBromoDibenzo-Dioxines (PBDD) et des PolyBromoDibenzo-Furanes (PBDF). 963

Figure 339 : Formules structurales de l'Ypérite au soufre, du thiodiglycol et de la Bis(2-chloroethyl) sulfone. 964

Figure 340 : Formules structurales des principaux thianes identifiés et du monochlorobenzène. 965

Figure 341 : Structure chimique du N-Ethylcarbazole: 966

Figure 342 : Obus chimique allemand à Croix bleue de calibre 77 mm long chargé de chlorure de diphénylarsine. 968

Figure 343 : Bouchons unique en verre et porcelaine de fiole d'obus à Croix bleue. A gauche, deux fioles d'obus de 77 mm long. Celle de gauche est partiellement fondue à sa base. Site de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse). 969

Figure 344: Bouchon unique en verre transparent bleu d'une fiole d'obus à Croix bleue de 77 mm. Site de la « Place à gaz ». 969

Figure 345 : Indicateurs physiques d'opérations de brûlage. 970

Figure 346 : Sous-produits organiques, organo-arséniés, et inorganiques, dérivant des chlorures de diphénylarsines. 972

Figure 347 : André Kling (1872-1947). Directeur du Laboratoire Municipal de la Ville de Paris, membre de la Commission des gaz asphyxiants, chargé par le GQG des enquêtes concernant les toxiques de guerre. 973

Figure 348 : Obus chimique allemand lacrymogène à « T-Stoff » dans un vase en plomb. 977

Figure 349 : Obus chimique allemand à Croix jaune de calibre 77 mm long chargé d'Ypérite au soufre. 978

Figure 350 : Les trois zones de pollution concentrées en étain (Sn). Zinc (Zn) et Arsenic (As) reconnues dans les sols au droit de l'ancienne usine de désobusage Clere & Schwander de Rampont (commune de Muzeray, Meuse). En haut à gauche, les deux taches très marquées en étain sur orthophotographie de 1922. 980

Figure 351 : Formules structurales des PolyChloroDibenzo-para-Dioxines, des PolyChloroDibenzoFuranes et PolyChloroBiphényles Dioxin-Like. Enumération des congénères et des analogues analysés. 982

Figure 352 : Résidus de brûlage modernes des sites du Ravin du Chaufour (Douaumont, Meuse) et SIMT à Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône). Aperçu photographique. 983

Figure 353 : ∑PCDF versus ∑PCDD (en haut) et ratio ∑PCDF / (∑PCDD + PCDF) versus teneurs mesurées (∑(PCDD + PCDF). 985

Figure 354 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF des sites SIMT à Saint-Martin-de-Crau (en haut) et du Ravin du Chaufour (Douaumont) (en bas). 987

Figure 355 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF des sites B-Factory (F.N. Pickett & Fils) à Westroozebeke (en haut) et du Bois Brûlé (Conteville) (en bas). 988

Figure 356 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt. 989

Figure 357 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site de la « Place à gaz » à Gremilly zone nord, en haut, et tache centrale, en bas). 990

Figure 358 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site Clere & Schwander de Rampont à Muzeray. 991

Figure 359 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site C-Factory de F.N. Pickett & Fils de Trélon et Liessies. 992

Figure 360 : Distribution de la population des teneurs en dioxines et furanes chlorées exprimées en TEQ (OMS, 1998). 994

Figure 361 : Teneurs en PCDD & PCDF en fonction de la profondeur (sondage SPM02 et SPM5) au droit du site de la « Place à gaz » à Gremilly (octobre 2014). 996

Figure 362 : Evolution des profils dioxines et furanes avec la profondeur pour les deux sondages réalisés au droit de la « Place à gaz » à Gremilly (octobre 2014). 997

Figure 363 : Contribution relative des PCB-DL du sol SPIN03 a) teneurs, b) toxicité TEQ-OMS 2005. . 999

Figure 364 : Teneurs en arsenic versus teneurs en ∑(PCDD + PCDF) (terrains et tranchées de brûlage) (n = 99). 1002

Figure 365 : Teneurs en zinc versus teneurs en ∑(PCDD + PCDF) (terrains et tranchées de brûlage) (n = 94)..... 1002

Figure 366 : Formules structurales de stabilisants des ergols solides nitrocellulosiques (Centralite, diphénylamine et 4-nitrodiphénylamine)..... 1004

Figure 367 : Formation des PCDD & PCDF en fonction de la température et courbe de fusion du verre. 1005

Figure 368 : Distribution des échantillons entre points aléatoires (AL). captages à gros débit (GD) et points d'intérêt (PI XPLO). A gauche, les eaux brutes et à droite les eaux traitées. 1021

Figure 369 : Répartition des analyses LHN ANSES (2020-2022) par département en région Grand'Est. 1022

Figure 370 : Communes dont les EDCH ont été échantillonnées pour la recherche de résidus d'explosifs par le LHN, ANSES (campagne nationale ANSES et campagne PRSE3 (2020-2022)) 1023

Figure 371 : Taux de fréquence de détection parmi les échantillons présentant au moins un positif (ANSES, 2020-2022)..... 1025

Figure 372 : Représentation radar des fractions des isomères du DNT parmi la somme des concentrations en 2,3-, 2,4-, 2,6- et 3,4-DNT..... 1025

Figure 373 : Distribution des concentrations (ng.L^{-1}) en DNT, ADNT et DNB (ANSES, (2020-2022)).. 1026

Figure 374 : Somme des concentrations des isomères du DNT (ng.L^{-1}) versus somme des concentrations en composés nitroaromatiques (ng.L^{-1}) (points pour lesquels au moins un isomère du DNT a été quantifié) (ANSES, 2020-2022)..... 1027

Figure 375 : Concentrations en ions perchlorate versus sommes des concentrations en composés nitroaromatiques (campagne nationale ANSES (2020 -2022))..... 1030

Figure 376 : Concentrations maximales mesurées (eaux brutes) en composés nitroaromatiques dans les EDCH (∑NAC), campagne nationale ANSES et PRSE3 (2020 – 2022). Régions Grand'Est et Hauts-de-France..... 1031

Figure 377 : Concentrations maximales mesurées (eaux brutes) en DNT dans les EDCH (∑DNT), campagne nationale ANSES et PRSE3 (2020 – 2022). Régions Grand'Est et Hauts-de-France..... 1032

Figure 378 : Localisation des secteurs ayant fait l'objet d'études approfondies (études sectorielles) et de prélèvements pour les analyses isotopiques Cl, O de ClO_4^-..... 1038

Figure 379: Système de prélèvement pour l'analyse isotopique des perchlorates..... 1041

Figure 380 : Coupe géologique simplifiée (ouest – est) du versant est du massif de l'Argonne et de la butte témoin de Vauquois..... 1046

Figure 381 : Géomorphologie et géologie de l'Argonne. Localisation du secteur d'études..... 1047

Figure 382 : Coupe hydrogéologique simplifiée de la Butte de Vauquois et organisation des systèmes de galeries de mines français (flanc sud, à droite) et allemands (flanc nord, à gauche)..... 1049

Figure 383 : a) Descenderie allemande fortement inclinée (Fille Morte, Argonne)..... 1050

Figure 384: Karl Bruno Julius Mudra, au premier plan et au centre, en haut à gauche le Kronprinz, fils de Guillaume II, à la tête de la Ve Armée. 1053

Figure 385 : Position et évolution du front argonnais..... 1053

Figure 386 : Canevas de tir français d'Argonne est (la Fille Morte, la Haute-Chevauchée et les Petites Courtes-Chausses) (1915). 1054

Figure 387 : Canevas de tir français d'Argonne ouest (Corniche, les Grandes Courtes-Chausses) (1915). 1054

Figure 388 : La guerre de mines en Argonne. Aperçu photographique. 1058

Figure 389 : Nombre de camouflets français donnés entre octobre 1916 et décembre 1917. 1062

Figure 390 : Vue aérienne oblique de la butte de Vauquois de nos jours, vue vers l'est. 1063

Figure 391. a) Pic, pelle et caisses d'explosif (dynamite-gomme) abandonnés sous terre en Argonne (mine française Z). A droite, au sol, une sphère d'extinction (Photo : Guillaume Jacquinet), b), d) dépôt d'explosif souterrain français dans un abri à La Corniche, Argonne ouest, c) charge d'autodestruction en place prête à fonctionner à l'entrée de la galerie française S, donnant sur le flanc sud de la butte de Vauquois (Photo : Guillaume Jacquinet), e) Dynamite-gomme française (Photo : Guillaume Jacquinet). Les bâtons de dynamite portent la date de leur sortie d'usine (août 1917). 1065

Figure 392 : Découverte de la charge allemande de Perdite dans le système allemand A3 à la Haute-Chevauchée (Argonne, octobre 2021) 1066

Figure 393 : Dépôts de bombes de tranchées à ailettes françaises type T58 DLS dans une soute d'une galerie du système de mine française «Z » à la Haute-Chevauchée (Photo : Guillaume Jacquinet).... 1067

Figure 394 : Grenades à manche et grenades sphériques allemandes partiellement corrodées abandonnées sous terre. Butte de Vauquois (Photo : Guillaume Jacquinet). 1067

Figure 395 : Observations à proximité de site de destruction de munitions supposé des Courtes-Chausses. Aperçu photographique. 1068

Figure 396 : Distribution des populations de concentration en ions perchlorate, secteur Argonne (n = 47). 1071

Figure 397 : Concentrations en ions nitrates versus concentrations en ions perchlorate en Argonne (n = 42). 1071

Figure 398 : Distribution des concentrations en anions et cations majeurs dans les eaux des sources et galeries de l'Argonne. 1072

Figure 399 : Organisation des réseaux de tranchées allemandes (au nord en bleu) et françaises (au sud en rouge) et localisation des secteurs d'étude en Argonne. D'après les Plans Directeurs des Groupes de canevas de tir pour la période 1916–1918. 1073

Figure 400 : Secteur Argonne. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2017 – 2021). 1074

Figure 401 : Secteur Argonne, sous-secteur Four-de-Paris. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2017-2021). 1075

Figure 402 : Secteur Argonne, sous-secteur La Harazée. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2019). 1076

Figure 403 : Secteur Argonne, sous-secteur Servon. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2018 – 2019). 1077

Figure 404 : Concentrations en composés nitroaromatiques quantifiés dans les eaux en Argonne (avec au moins un positif) (juillet 2021). 1079

Figure 405 : Signatures des composés nitroaromatiques quantifiés dans les eaux en Argonne (avec au moins un positif) (juillet 2021). *1079*

Figure 406 : Profil des concentrations en composés nitroaromatiques des eaux des sources et galeries à Vauquois (composés ayant au moins un positif) (2019-2023). *1082*

Figure 407 : Concentrations en composés nitroaromatiques mesurés dans les eaux des sources et galeries à Vauquois (composés ayant au moins un positif) (2019-2023). *1082*

Figure 408 : Distribution des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des eaux dans le secteur de Vauquois (2016-2023). *1083*

Figure 409 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques (avec au moins un positif) des eaux dans le secteur de Vauquois (2019-2023). *1084*

Figure 410 :, $\delta^{18}O$ versus $\delta^{15}N$ des eaux des sources échantillonnées dans les secteurs de l'Argonne et de Vauquois (points jaune (Vauquois), croix bleues (Argonne)). *1085*

Figure 411 : Le Général d'Armau de Pouydraguin au Linge, janvier 1916. ..... *1088*

Figure 412 : Position du front dans les Vosges et d'Alsace. *1089*

Figure 413 : Le champ de bataille du Linge et le réseau des tranchées principales. *1093*

Figure 414 : Résultats analytiques des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources échantillonnées dans le secteur du Lingekopf (octobre 2017). Cerclé d'orange, la position supposée du tunnel Caudriller. *1096*

Figure 415 : La Chapelotte, au nord de Celles-sur-Plaine. Creusement au perforateur pneumatique dans le Poudingue et aperçu photographique des positions françaises. *1100*

Figure 416 :La Chapelotte ; aperçus photographiques des souterrains creusés dans le Grés vosgien.1101

Figure 417 : Altitudes des sources échantillonnées et concentrations en ions perchlorate mesurées en 2017 à La Chapelotte *1102*

Figure 418 : Concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources du secteur de La Chapelotte (octobre 2017) *1104*

Figure 419 : Compilation des résultats analytiques pour les concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources captées du hameau d'Allencombe, commune de Badonviller, secteur de La Chapelotte (2014-2022). *1105*

Figure 420 : Compilation des résultats analytiques pour les concentrations en composés nitroaromatiques (avec au moins un positif) pour les sources AEP d'Allencombe, secteur de La Chapelotte (2021-2022). *1106*

Figure 421 : Entonnoir de mine ouvert dans la Craie blanche. Cote 200, Perthes-lès-Hurlus. Avril 1916. ..... *1108*

Figure 422 : Localisation du secteur d'étude de l'est marnais et distributions des concentrations en ions perchlorate des EDCH des départements de la Marne et des Ardennes (2014). *1109*

Figure 423 : Profils de concentrations en composés nitroaromatiques, secteur de Suippes (2021- 2023). *1113*

Figure 424 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques, secteur de Suippes (2021-2023). *1113*

Figure 425 : Compilation des résultats analytiques des concentrations en ions chlorate et perchlorates des eaux échantillonnées dans le secteur est marnais de Suippes (2016-2023). *1114*

Figure 426 : Compilation des résultats analytiques des concentrations en composés nitroaromatiques des eaux échantillonnées dans le secteur est marnais de Suippes (2021-2023). *1115*

Figure 427 : Evolution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH de Neufchâtel-sur-Aisne entre 2014 et 2022. ..... *1116*

Figure 428 : Localisation du puits AEP de Neufchâtel-sur-Aisne. *1117*

Figure 429 : Localisation de l'AEP de Neufchâtel-sur-Aisne et distributions des concentrations en ions perchlorate des EDCH du département de l'Aisne (2013). Habillage par des éléments de contexte historique et hydrogéologique. *1118*

Figure 430 : Localisation du captage de Cramont et des sites de destruction de munitions. Aperçu photographique des projectiles allemands (obus et Minen) découvert à l'emplacement supposé du terrain d'explosion. *1120*

Figure 431 : Marquage perchloraté du secteur de Cramont – Conteville –Domléger (département de la Somme) (2013). Localisation du captage de Cramont et habillage par des éléments historiques et hydrogéologiques. *1121*

Figure 432 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques des EDCH du captage de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne). *1123*

Figure 433 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques des EDCH du captage de Cramont (département de la Somme) *1123*

Figure 434 : Résultats $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ (haut) et $D^{17}O$ / $\delta^{18}O$ (bas). *1127*

Figure 435 : Résultats $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$, zoom sur le nuage de points des perchlorate de synthèse. *1128*

Figure 436 : Distributions des pourcentages relatifs des isomères du DNT dans ∑DNT (n = 43). *1133*

Figure 437 : Schéma conceptuel de transfert de la butte de Vauquois. *1136*

Figure 438 : Schéma conceptuel de transfert des ions perchlorate. Secteur de La Chapelotte. Hypothèse d'une charge non explosée abandonnée. *1139*

Figure 439 : Cartographie des secteurs de guerre de mines (en rouge, quelques hauts lieux de la guerre de mines). *1143*

Figure 440 : Site de la guerre de mines et terrains d'explosion de la Cote 108 à Berry-au-Bac (département de l'Aisne). *1144*

Figure 441 : Rassemblement de Restes Explosifs de Guerre et concentration des masses de composés. *1145*

Figure 442 : Présence d'ions perchlorate dans les EDCH des grandes régions Hauts-de-France et Grand'Est (2011-2016) et localisation des anciennes lignes du front occidental et des sites de destruction de Restes Explosifs de Guerre (BRGM, 2018). *1148*

Figure 443 : Neutralisation de munitions anciennes de conception ex-allemandes de la Première Guerre mondiale en Macédoine (secteur de Bitola). *1186*

Figure 444 : Cartographie de la surincidence des maladies inflammatoires chronique de l'intestin. *1203*

Figure 445 : Ligne de brûlage de munitions anciennes en Ukraine en 2019 ..... *1206*

Liste des tabeaux

Tableau 1 : Composition d'eaux mères de raffinage de nitrates du Chili (1917). 95

Tableau 2 : Formulations d'explosifs explicitement chloratés et perchloratés de la Première Guerre mondiale identifiées dans le cadre de la recherche. 123

Tableau 3 : Résultat analytique sur des alliages de fusées allemandes constituées d'alliages Zn Cu. .. 144

Tableau 4 : Production et importation de poudres et d'explosifs en France durant la Première Guerre mondiale 146

Tableau 5 : Provenance des explosifs nitrés disponibles en France pour les armées durant la Première Guerre mondiale. 147

Tableau 6 : Production allemande de toxiques de guerre durant la Première Guerre mondiale. 153

Tableau 7 : Matrice faisant le lien entre les matières énergétiques et agressive constituant les engins de guerre et leurs composition chimique sur la base des données historiques. 155

Tableau 8 : Echantillons de poudres et explosifs analysées. 158

Tableau 9 : Nature et origine des composés analyses par injection Directe en LC-MS/MS par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES. 168

Tableau 10 : Nature et origine des composés analysés en GC-MS/MS après extraction SBSE par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES. 169

Tableau 11 : Résultats du screening de recherche systématique des liaisons organiques (Envilytix GmbH). 177

Tableau 12 : Impuretés et sous-produits de transformation environnementale des composés constituant les poudres, explosifs et matières agressives. 229

Tableau 13 : Diversité des projectiles d'artillerie de tranchée allemande. Récapitulatif publié en mars 1918. 284

Tableau 14 : Apparition des agents de combat sur le champ de bataille durant la Première Guerre mondiale (A = Alliés, E = Entente). *297*

Tableau 15 : Munitions chimiques livrées aux armées en Allemagne. 300

Tableau 16 : Consommation française journalière de munitions (pour trois calibres) lors de grandes offensives. 309

Tableau 17 : Nombre de tirs de l'artillerie française selon les gammes de calibre au cours de trois offensives entre 1915 et 1917. 311

Tableau 18 : Production journalière française des munitions de calibre 75, 155 et 220 mm au cours de la guerre. 312

Tableau 19 : Estimations des quantités de munitions d'artillerie lourde et de campagne tirées par la France et l'Allemagne durant la Première Guerre mondiale et le front occidental. 315

Tableau 20 : Nature et quantités de munitions tirées par l'artillerie de campagne et l'artillerie lourde durant la Première Guerre mondiale 316

Tableau 21 : Projectiles de tranchées produits et/ou tirés durant la Première Guerre mondiale. 318

Tableau 22 : Dépôts de munitions abandonnés sur le territoire anciennement annexé de Lorraine inventoriés dans l'immédiate sortie de guerre. 406

Tableau 23 : Surplus de munitions de l'American Expeditionnary Force début 1919. 418

Tableau 24 : Taux de munitions détruites parmi les munitions visées par les réfections par le parc régional de réparation et d'entretien de Metz. 585

Tableau 25 : Superficies occupées par les dépôts de munitions de l'AEF en date du 19 novembre 1918. 596

Tableau 26 : Evolution des surplus des munitions chimiques de la Grande Guerre entre 1920-1930 (en nombre d'unités). 602

Tableau 27 : Listing des usines, terrains de destruction et dépôts exploités par F.N. Pickett & Fils. 636

Tableau 28 : Périodes d'exploitation des différents chantiers et usines F.N. Pickett & Fils. 637

Tableau 29 : Tonnage de munitions livré et démolie et taux de démolition de F.N. Pickett & Fils dans l'usine *B-Factory* de Westroozebeke. 642

Tableau 30 : Extraits des annonces publicitaires de L'Est Républicain du 14 Août 1927 et du 11 Septembre 1927. 646

Tableau 31 : Agrégation des données quantitatives relatives aux tonnages de munitions détruites dans l'entre-deux-guerres. 765

Tableau 32 : Données quantitatives complémentaires relatives aux tonnages et aux nombre d'engins détruits. 766

Tableau 33 : Temps théoriques de perforation par corrosion de quelques projectiles d'artillerie de campagne utilisés pendant la Première Guerre mondiale (pour une vitesse moyenne de corrosion de 0,025 mm.an^{-1}). *816*

Tableau 34 : Comparaison des temps théoriques de dissolution de résidus d'explosifs en fonction de leur taille et pour une précipitation moyenne annuelle de 750 mm. 819

Tableau 35 : Résultats analytiques des résidus d'explosifs dans les sols et matériaux d'un site temporaire de pétardement de munitions allemandes datant de la Seconde Guerre mondiale. 830

Tableau 36 : Résultats analytiques des sols au point de détonation par OD de trois obus de la Première Guerre mondiale (2017) à Noire Fontaine (Vaudoncourt, département de la Meuse). Laboratoire Envilytix GmbH (Wiesbaden, Allemagne). 834

Tableau 37 : Résultats analytiques sur les échantillons de sol prélevés en dans les entonnoirs d'éclatement du site de destruction de munition du Ravin du Chaufour (Douaumont, forêt domaniale de Verdun, département de la Meuse) (Envilytix GmbH) 836

Tableau 38 : Résultats analytiques d'échantillons de sol collecté au sein et aux abords du champ d'explosion de munitions ex-allemandes de l'usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (juillet 2014). 837

Tableau 39 : Simulation des fractions résiduelles des chargements après détonation de 1 000 tonnes de munitions. 842

Tableau 40 : Résultats analytiques sur les échantillons de sols de surface collectés au droit du terrain d'éclatement de Vaudoncourt Loison (janvier 2015). Métaux. (laboratoire Wessling). 862

Tableau 41 : Résultats analytiques sur les échantillons de sol de surface prélevés au droit du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison (janvier 2015). Composés énergétiques, toxiques de guerre et sous produits de transformation (Envilytix GmbH). 865

Tableau 42 : Valeurs hautes de bruit de fond en éléments tracées métalliques et gammes de valeurs anomaliques pour le site de Noire Fontaine à Vaudoncourt. 872

Tableau 43 : Récapitulatif de l'échantillonnage réalisé sur les sites de destruction de munitions par brûlage. 896

Tableau 44 : Résultats analytique sur des échantillons de Trompettes des Morts cueillis au droit et aux abords de la clairière de la « Place à gaz », septembre 2014. 901

Tableau 45 : Teneurs proposées pour les valeurs hautes du fond géochimique local et gammes de teneurs anomaliques pour les sols de surface du site de la Ferme de Rampont à Muzeray (Janvier 2015-août 2016). 926

Tableau 46 : Valeurs hautes du fond géochimique en éléments tracées métalliques et gammes de valeurs anomaliques pour le site de Noire Fontaine à Vaudoncourt (Janvier 2015-août 2016). 927

Tableau 47 : Valeurs hautes du fond géochimique en éléments traces métalliques retenues pour les sites de Noire Fontaine et de Rampont. 927

Tableau 48 : Concentrations en chlorure, chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium sur lixiviats des échantillons composites constitués au droit et aux abords du site de brûlage de la « Place à gaz » (laboratoire du BRGM). 943

Tableau 49 : Résultats analytiques comparatifs (entre extraction aux solvants organiques et lixiviation à l'eau) sur un échantillon composite de sol marqué par la présence d'éléments visibles d'explosifs issu du site de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt (Envilytix GmbH). 946

Tableau 50 : Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Envilytix GmbH) des échantillons composites solides sur brut (extraction aux solvants) et fréquences de détection. Hors site de Zweedorf (Allemagne). 949

Tableau 51: Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Envilytix GmbH) des échantillons composites solides sur lixiviat (extraction à l'eau) et fréquences de détection. Hors site de Zweedorf (Allemagne). 950

Tableau 52 : Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Dr Haas) des échantillons composites solides sur brut (extraction aux solvants) et fréquences de détection. Site de Zweedorf (Allemagne). 950

Tableau 53 : Teneurs maximales mesurées (en mg.kg^{-1} MS) en composés nitroaromatiques par analyses d'échantillons solides composites après extraction aux solvants (laboratoire Envilytix GmbH, Dr Haas (Zweedorf)). 951

Tableau 54 : Concentrations maximales mesurées (en µg.L^{-1}) en composés nitroaromatiques par analyse des échantillons solides composites après lixiviation à l'eau (laboratoire Envilytix GmbH). 952

Tableau 55 : Résultats analytiques et statistiques des sols et résidus de brûlage visant les composés organo-arséniés sur brut et après extraction aux solvants (laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne). 959

Tableau 56 : Résultats analytiques et statistiques des sols et résidus de brûlage visant les composés organo-arséniés sur éluta après extraction par lixiviation à l'eau (laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne). 959

Tableau 57 : Résultats analytiques du brome et de l'iode lixiviables sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Grémilly). département de la Meuse (BRGM). 962

Tableau 58 : Résultats analytiques des dérivés organo-bromés et organo-iodés sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Envilytix GmbH). 962

Tableau 59 : Résultats analytiques du tétrabromoéthane sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage du site de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt). département de la Meuse (Envilytix GmbH). 963

Tableau 60 : Résultats analytiques des PolyBromoDibenzoDioxines (PBDD) et PolyBromoDibenzoFuranes (PBDF) sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Grémilly). département de la Meuse (Dioxlab). 964

Tableau 61 : Résultats analytiques des dérivés et impuretés de l'ypérite soufrée sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » et des sites Clere & Schwander de Rampont (Muzeray) et Noire Fontaine (Vaudoncourt). département de la Meuse (Envilytix GmbH). 965

Tableau 62 : Evaluation des quantités d'arsine et de projectiles à Croix bleue détruits par brûlage sur le site de la « Place à gaz ». 975

Tableau 63 : Profils de teneurs en PCDD & PCDF au droit de résidus de brûlage des sites de Rampont et de Noire Fontaine. 998

Tableau 64 : Bilan des analyses réalisées par le LHN ANSES en régions Grand'Est et Hauts-de-France (2020-2022). 1022

Tableau 65 : Comparatif des sommes des composés nitroaromatiques pour les eaux brutes et les eaux traitées des EDCH pour lesquelles le couple est positif (ANSES, 2020 – 2022). 1028

Tableau 66 : Points échantillonnés pour l'analyse isotopique des ions perchlorate. 1042

Tableau 67 : Résultats analytiques concentrations en ions chlorate et perchlorate dans les eaux brutes, les eaux javellisées et l'Eau de Javel de traitement pour les EDCH de Souain Perthes-les-Hurlus et Dontrien (2023). 1112

Tableau 68 : Hydrosolubilités et K_{ow} des isomères du dinitrotoluène (DNT). 1132

Liste des annexes

ANNEXE A	Résultats analytiques sur les échantillons d'ergols solides et d'explosifs
ANNEXE B	Résultats des analyses des isotopes stables O, Cl des ions perchlorate (Laboratoire Université du Delaware, USA) et N, O des ions nitrates (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble) dans les échantillons d'ergols solides et d'explosifs
ANNEXE C	Préparation du chantier de sondages à la pelle mécanique au droit de deux sites du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander du canton de Spincourt (2018)
ANNEXE D	Echantillonnage réalisé et méthodes analytiques appliquées dans le cadre de la caractérisation des sols et des résidus des terrains de destruction des Restes Explosifs de Guerre par brûlage (Open Burning)
ANNEXE E	Jeu de données de teneurs en métaux et métalloïdes retenu pour le traitement statistique par Analyse en Composante Principale (ACP)
ANNEXE F	Principe de l'Analyse en Composante Principale
ANNEXE G	Résultats analytiques sur les sols et résidus issus des terrains de liquidation de Restes Explosifs de Guerre par brûlage (*Open Burning*)
ANNEXE H	Résultats analytiques des composés nitrés des campagnes nationales et régionales de recherche des résidus d'explosif de l'ANSES (2020-2022) pour les régions Grand'Est et Hauts-de-France. Echantillons présentant au moins un positif (laboratoire LHN, ANSES)
ANNEXE I	Résultats analytiques sur les eaux souterraines et de surface des études sectorielles
ANNEXE J	Résultats analytiques des abondances en isotopes stables O, Cl de ClO_4^- (Université du Delaware, USA) et de N, O de NO_3^- (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble) des eaux souterraines et de surface

Introduction générale & problématique posée

1. Emergence

« Il n'est point de secrets que le temps ne révèle[1] »

L'accroissement de nos connaissances sur l'état de notre environnement et en particulier sur la qualité des eaux souterraines dont nous tirons les eaux potables, agricoles et industrielles essentielles à nos activités, sous la houlette notamment des progrès des techniques (de dosage) de la chimie analytique, du renforcement des exigences et contrôles réglementaires, des recherches académiques comme appliquées et de signalements locaux d'impacts significatifs, fait régulièrement surgir des problématiques environnementales nouvelles et la mise en évidence de marquages environnementaux dits « émergents ». Le terme générique de « polluant émergent » regroupe les substances chimiques non réglementées et qui ne figurent pas parmi celles dosées en routine dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) à la faveur des contrôles sanitaires. Il s'agit bien souvent de molécules de synthèse, pas nécessairement d'un usage actuel et nouveau, mais généralement d'origine ancienne, historique, qui semblaient tapies dans l'oubli et qui brutalement font irruption dans le présent, prenant les personnes exposées au quotidien à ces substances, les gestionnaires des eaux et les services compétents garants de la santé par surprise et au dépourvu, un terreau d'incertitudes favorable à la genèse de situations de crise, relayées dans les médias comme par exemple pour la mise en évidence dans des EDCH de composés pharmaceutiques, de métabolites de pesticides ou encore plus récemment de PFAS[2]. Les données et connaissances concernant leur origine, les sources émettrices, leur devenir spatial et temporel dans l'environnement et leurs impacts potentiels sur la santé sont en effet au moment de la découverte, parcellaires, voire inexistantes. Les méthodes d'analyse sont le plus souvent au stade de la recherche et développement, ou réservées à quelques laboratoires de recherche hautement spécialisés ou n'ont pas encore été harmonisées au niveau européen[3]. L'identification et l'étude du devenir des polluants émergents constituent des enjeux majeurs pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines avec en creux les questions des mécanismes en jeu quant à leurs origines et leur rémanence. Une connaissance approfondie de la dynamique des polluants émergents et du temps de transfert sont des paramètres clé qui permettent de mieux évaluer et de prévenir les risques pour les eaux souterraines, comme d'y remédier.

Une problématique inédite émergea ainsi par l'identification dans les eaux souterraines en France métropolitaine de molécules qui trouvent des applications industrielles actuelles mais aussi anciennes. Il s'agit des ions perchlorate, un oxyanion du chlore de formule brute ClO_4^-. Fin 2010, les ARS (Agences Régionales de la Santé) Midi-Pyrénées et Aquitaine furent informées de la présence d'ions perchlorate dans des eaux brutes de certains captages. En Aquitaine, certains échantillons d'eau de boisson titraient entre 1 et 10 $\mu g ClO_4^-.L^{-1}$ (concernant ~ 325 000 habitants) et en Midi-Pyrénées entre 1 et 5 $\mu g ClO_4^-.L^{-1}$, (concernant ~ 250 000 personnes). Ces marquages perchlorates étaient en relation, à Toulouse et à Bordeaux, avec des activités industrielles. Le puits d'alimentation en eau potable d'une partie de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) était touché. Il se situait en aval de la poudrerie nationale historique de Saint-Médard-en-Jalles (ex-SNPE (Société Nationale des Poudres et Explosifs) devenue l'entreprise Safran Héraklès).

---

[1] Racine, J. (1670) *Britannicus*, Acte IV, scène 4.

[2] Composés per- et polyfluoroalkylées persistants, médiatisés sous le qualificatif de « polluants éternels ».

[3] Polesell, S., Quevauviller, P. (2018). « Qu'est-ce qu'un polluant émergent ? Exemples. Techniques analytiques pour les polluants émergents » in *Techniques de l'ingénieur*.

Les sels de perchlorate qui entrent dans la composition des ergols solides (poudres propulsives) produits sous forme de $NaClO_4$ à Jarrie (département de l'Isère) depuis 1990, sont transformé en NH_4ClO_4 à Toulouse, puis conditionnés dans ce site girondin pour équiper les blocs propulseurs des missiles balistiques dans l'aéronautique militaire et des accélérateurs latéraux (*boosters*) des lanceurs (comme les fusées Ariane) dans l'aéronautique civile.

Suite à ce signalement, la Direction Générale de la Santé (DGS) saisit son expert technique, compétent en toxicologie et évaluation des risques, l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), afin d'émettre un avis sur les concentrations limites recommandées dans l'eau de boisson à ne pas dépasser pour protéger la population. Le perchlorate ne possédait en effet à cette date en France aucune valeur limite ou de référence dans les eaux distribuées pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP), L'ANSES produit en juillet 2012 « *l'Avis relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence d'ions perchlorate dans les eaux destinées à la consommation humaine du 18 juillet 2011, complété par l'Avis du 20 juillet 2012 (relatif aux études épidémiologiques)* » en se basant sur des calculs de seuils volontairement protecteurs et sécuritaires.

L'ANSES recommanda ainsi (i) une valeur de 15 µg $ClO_4^-.L^{-1}$ en vue de prévenir les risques sanitaires liés à la consommation d'eau distribuée pour le consommateur adulte, dans les conditions habituelles, (ii) une valeur de 4 µg $ClO_4^-.L^{-1}$ pour le nourrisson de moins de six mois, et si possible de ne pas utiliser une eau présentant des ions perchlorate pour la préparation des biberons des nourrissons jusqu'à six mois, et (iii) la réalisation d'une enquête nationale sur la présence de ClO_4^- dans les aliments, en particulier pour préciser les teneurs retrouvées dans les formulations de lait maternisé en poudre utilisées pour la préparation des biberons. Ces valeurs n'avaient aucun statut réglementaire.

L'ANSES dans son avis du 20 juillet 2012 mit en exergue les incertitudes sur les effets chroniques réels des ions perchlorate sur la santé (notamment en lien avec la méconnaissance du degré d'imprégnation de *la population française en iode qui concurrence la fixation des ions perchlorate sur la glande thyroïde) et conclut « qu'au vu des données disponibles à ce jour, un dépassement modéré de la valeur de 15 µg$ClO_4^-.L^{-1}$chez l'adulte, notamment chez la femme enceinte, et de 4 µg$ClO_4^-.L^{-1}$chez le nouveau-né ne semble pas associé à des effets cliniquement décelables*[4] *».*

Les acteurs de l'eau et de la santé, la DGS, les ARS et l'ANSES se questionnèrent alors à raison si les occurrences en ions perchlorate décelées dans les EDCH du sud-ouest de la France étaient une exception ou participaient à un marquage plus vaste par ces ions des ressources en eaux à l'échelle du territoire national, cette question n'ayant alors jamais encore posée auparavant. C'est ainsi que l'ANSES débuta dès 2011 dans le cadre de ses missions d'exploration de la qualité des eaux souterraines de substances non réglementées (potentiellement émergeantes) ses programmes locaux et régionaux de recherche du perchlorate dans l'eau de boisson selon un protocole de sélection des points d'échantillonnage considérant pour chaque département (i) le captage le plus important en terme de population desservie, (ii) un captage tiré au hasard et, (iii) un captage d'intérêt du fait de sa vulnérabilité aux polluants recherchés. Une seconde campagne nationale (de contrôle) fut ensuite réalisée pour consolider les premiers constats. Les résultats montrèrent la présence des ions perchlorate dans de nombreux captages, et certains d'entre eux à des concentrations supérieures aux valeurs recommandées par l'ANSES, notamment celui de Flers Escrebieux en région Nord-Pas-de-Calais (appartenant à l'actuelle grande région des Hauts-de-France) a priori sans lien avec une quelconque activité industrielle émettrice de perchlorate.

---

[4] ANSES (2012). *Avis relatif aux études épidémiologiques portant sur les associations entre une exposition aux ions perchlorate dans l'eau de boisson et la fonction thyroïdienne dans des populations spécifiques*. Saisine 2012-SA-0119. Saisine(s) liée(s) n° 2011-SA-0024 ; 2011-SA-0208 ; 2011-SA-0336. https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012sa0119.pdf

Ce constat poussa les ARS à s'interroger sur l'extension de l'impact perchloraté sur les eaux de boisson à l'échelle régionale dans le Nord Pas-de-Calais et ordonnèrent alors en 2012 qu'une recherche systématique des perchlorates dans l'eau du robinet soit engagée au niveau régional. Les résultats furent sans équivoque : l'empreinte perchloratée était régionale avec 544 communes concernées dans la région. Les concentrations en perchlorate les plus élevées furent relevées au sein d'une bande nord-sud de plusieurs dizaines de kilomètres de large, entre Béthune, Lens, Arras et Cambrai.

Ces constats ayant été rendus public, les médias s'emparèrent rapidement de cette problématique anxiogène pour laquelle aucune explication apparente ne pouvait être donnée. Une hypothèse vint toutefois à être privilégiée pour cela. Dans l'Histoire de la région, la bande du territoire renfermant les eaux perchloratées correspondait peu ou prou aux anciennes lignes de front stabilisées de la Première Guerre mondiale. Historiquement, le perchlorate entrait dans la composition de certains explosifs utilisés dans les grenades, mines et bombes de tranchées. Des conclusions furent hâtivement avancées et diffusées se focalisant sur leur origine, pour éteindre le feu médiatique et l'agitation socio-politique autour d'une pollution restée sans responsable (solvable) et sans réelle explication, mais aussi, plus préoccupant, sans solution.

Une origine historique militaire, en lien avec les évènements de la Première Guerre mondiale fut pressentie « C*'est en 2012 qu'une contamination des ressources souterraines par les ions perchlorates est mise en évidence sur l'ancienne ligne de front de la Première Guerre mondiale*[5] ».

Perplexe, j'y voyais là plus un postulat qu'une démonstration solide. L'idée que cette empreinte sur nos eaux souterraines serait le fruit des combats de la Grande Guerre, des obus et mines enfouis qui rouillent çà et là, que ce sont nos pères qui se sont battus dans des circonstances exceptionnelles et donc qu'aucune responsabilité ne peut être engagée pour remédier à cette situation, était confortable et consensuelle. Il n'existait pourtant alors en 2012 aucune étude publiée qui puisse établir sur des bases scientifiques (environnementales et historiques) fiables le lien irréfutable entre les évènements de la Grande Guerre et le marquage des eaux souterraines par les ions perchlorate. Des études furent confiées par des puissances publiques à des entreprises privées exploitantes d'eau pour rechercher les sources de pollution. Elles ne furent pas conclusives. Par ailleurs, la superposition des secteurs perchloratés avec les lignes de front de la Grande Guerre n'est pas flagrant, les occurrences perchloratées dans les eaux distribuées ayant tendance à se concentrer à l'est des lignes de front stabilisées (cf. Figure 1). Par ailleurs, des « spots » perchloratés furent aussi constatés loin des lignes de front et zones de combat. La thèse de F.F. Cao soutenue à Reims le 5 Mars 2020[6] affirmait faire le lien entre le marquage perchloraté des ESO et l'histoire de la Première Guerre mondiale. Elle démontre la présence de perchlorate d'origne synthétique et anthropique mais pas une source d'origine militaire en lien avec le conflit de 1914-1918.

Fortes de ces conclusions et constats, les ARS poursuivirent la recherche systématique des ions perchlorate dans les EDCH dans les départements traversés par les anciennes lignes de front, avec en 2012, les départements de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise (région Picardie). Les ARS produisirent des cartes de la distribution des concentrations qui démontraient la continuité du marquage perchloraté dans les EDCH depuis la région Nord-Pas-de-Calais, vers la Picardie. Entre 2013 et 2015 la recherche des ions perchlorate dans les EDCH s'étendit aux régions Champagne Ardenne, Lorraine puis Alsace.

---

[5] Environnement Magazine (2017). *Eau. Perchlorates, un casse-tête pour le Nord Pas-de-Calais*, publié le 6 avril 2017. https://www.environnement-magazine.fr/eau/Article/2017/04/06/49207/perchlorates-cassetete-pour-nord-pasdecalais

[6] Cao, F., F. (2020). *Approche interdisciplinaire pour la caractérisation hydrogéologique du milieu crayeux : application au transfert de perchlorates dans la craie de Champagne*. Thèse de doctorat. Reims. Mars 2020.

L'ARS Lorraine, d'abord inquiète, vue l'histoire de cette région durant la Grande Guerre, fut bien surprise en constatant que seuls quelques secteurs isolés présentaient des ions perchlorate dans les eaux distribuées et que les zones que l'histoire retient comme meurtries par la Grande Guerre semblent avoir été épargnées, en particulier Verdun. Parmi ces secteurs perchloratés, l'un était localisé dans les Vosges gréseuses, versant lorrain, à proximité du col de La Chapelotte (département de la Meurthe-et-Moselle) et le second à Lachalade en Argonne (département de la Meuse). Côté alsacien, deux secteurs apparurent particulièrement impactés, tous deux correspondants aux champs de bataille des Hautes-Vosges du département du Haut-Rhin, particulièrement actifs en 1915 : le Lingekopf (commune de Hohrod) et l'Hartmannswillerkopf (le « Vieil Armand »).

Chez les populations exposées, voilà un environnement qui jusqu'alors avait fait l'objet d'une pleine et libre jouissance qui soudainement se retournait comme un gant en devenant synonyme de mise en péril potentielle et source de préoccupation. Le pouvoir anxiogène de ces situations est décuplé lorsqu'elles ne trouvent pas de réponse mais soulèvent plus de questions et s'insèrent progressivement dans un climat d'incertitudes. La communauté scientifique, issue d'entreprises privées (exploitants d'eau) comme celle émanant d'établissements publiques, fut alors sollicitée afin de tenter apporter des réponses quant à l'origine de cette pollution, son étendue, les risques sanitaires associés pour *in fine* identifier les meilleures perspectives de gestion de la ressource en eau et de ses usages. Les risques sanitaires dépendent du temps d'exposition, et se posa en creux cette question complexe des tendances des concentrations en fonction du temps, si elles étaient stables, en progression ou en régression.

Sur la base des avis de l'ANSES de 2011, 2012 et 2014, qui reposent sur des calculs de seuils extrêmement protecteurs, la DGS recommanda, par principe de précaution, de (i) limiter l'utilisation d'eau dont la concentration en ions perchlorate dépasse 4 $\mu g ClO_4^-.L^{-1}$ pour la préparation des biberons des nourrissons de moins de six mois, et (ii) limiter la consommation d'eau dont la concentration en ions perchlorate dépasse 15 $\mu g ClO_4^-.L^{-1}$ pour les femmes enceintes et allaitantes (protégeant ainsi fœtus et nourrissons). (iii) de limiter les expositions via les denrées alimentaires, les laits maternisés et en cherchant à réduire les concentrations en ClO_4^- dans les EDCH[7].

[7] ANSES (2018). *Avis relatif à la pertinence de la ré-évaluation de la valeur guide pour les ions perchlorate dans l'eau destinée à la consommation humaine*. Décembre 2018.Saisines n° 2016-SA-0155 et 2017-SA-0170. Saisines liées n° 2011-SA-0024;2011-SA-0208 ; 2011-SA-0336;2012-SA-0119. https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2017SA0170.pdf

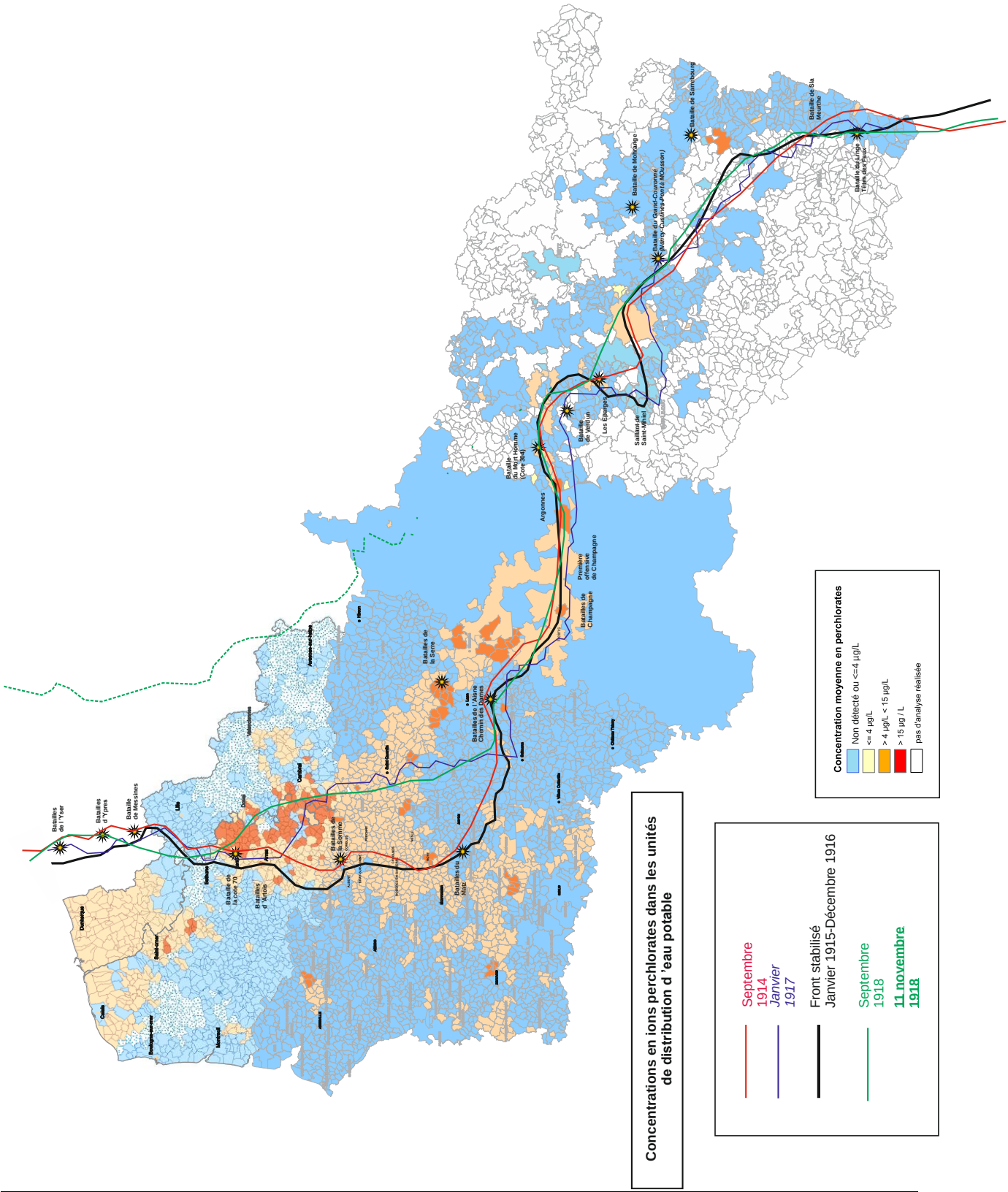


Figure 1 : Concentrations en ions perchlorate dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) en régions Hauts-de-France et Grand 'Est. Agrégation des données ARS (2011-2014). Position des principales lignes du front occidental de la Première Guerre mondiale[8].

[8] Hubé, D. (2016), d'après les données publiques publiées par les ARS (2011-2015).

Alors que la question de la présence et de l'origine des ions perchlorate dans les eaux de boissons dans les Haut-de-France inonda l'espace médiatique en 2012, une autre, mise en sommeil depuis, 2007, trouva avec l'approche des commémorations du Centenaire de la Grande Guerre et plus particulièrement avec celle des cérémonies mémorielles du 100e anniversaire du déclenchement de la bataille de Verdun en février 2016, un regain d'intérêt. Si le marquage régional des eaux souterraines et de boisson par les ions perchlorate semble abstrait, inodore, sans saveurs, incolore et donc invisible, la Grande Guerre aurait aussi laissé localement des pollutions sévères des sols, visibles, et spectaculaires.

Il existe en forêt de Spincourt, dans les anciennes lignes allemandes, à 20 km au nord-est de Verdun, (commune de Gremilly, département de la Meuse), une clairière aux sols noircis, dénudés, dépourvu de végétation, un ulcère noir connu sous le nom de « Place à gaz ». Cet endroit aurait servi historiquement de lieu de brûlage d'obus chimiques arséniés allemands dits à *Croix bleue* en nombre dans la sortie de guerre. L'absence actuelle de végétation serait l'expression de la phytotoxicité des matériaux qui y reposent et issus de ces brûlages. Ce sont des géochimistes allemands de l'université de Mayence qui, pionniers, furent les premiers en 2007-2008 à caractériser partiellement ce site qui s'avérait sévèrement pollué par l'arsenic et les éléments traces métalliques et certains composés organo-arséniés issus des toxiques de guerre qui ont été éliminés par brûlage[9]. Jusqu'en 2014, il s'agissait du seul site connu du grand public pour lequel les pollutions attribuables à la Grande Guerre étaient visibles. Bien que ce site, facile d'accès et sévèrement pollué par l'arsenic à des taux exceptionnels, expose l'environnement et ses usagers à des risques patents, aucune action destinée à comprendre, évaluer et gérer les risques éventuels associés ne fut engagée jusqu'à ce que le Centenaire vienne mettre sous les feux de la rampe ce « trublion » possible des cérémonies commémoratives du Centenaire de la bataille de Verdun en février 2016, en présence du président Hollande. Le documentaire à grande audience d'Isabelle Clarke et de Daniel Costelle sur la Première Guerre mondiale, *Apocalypse* , ne s'achève-t-il pas sur un *travelling* arrière depuis les airs sur la clairière, des images actuelles en couleur qui, au terme de près d'une heure d'images d'archives, faisaient soudainement se percuter le présent et le passé et nous rappeler que la Grande Guerre a fait d'autres victimes, généralement invisibles, toujours silencieuses, les sols et notre environnement ? La Préfecture de la Meuse saisit le BRGM en 2014 afin (i) d'effectuer une caractérisation détaillée du site et des extensions latérales et verticales des pollutions, leur nature, (ii) d'évaluer les éventuels risques environnementaux et sanitaires qui leurs sont associés pour *in fine* (iii) identifier les meilleures solutions technico-économiques pour maîtriser, réduire voire supprimer ces risques.

L'entité qui avait opéré ces brûlages, ses motivations et desseins, les méthodes appliquées et les moyens mobilisés étaient alors encore inconnus. J'entrepris alors un travail de recherche historique pour tenter de comprendre ce qui s'était joué au droit de ce site et quels en étaient les acteurs, qui me mena aux archives départementales de la Meuse à partir desquelles j'identifia très rapidement la date et l'acteur des démolitions des restes de guerre au droit de la « Place à gaz ». Ces recherches aux archives me conduisirent à suivre une trajectoire qui s'écarta de la « Place à gaz » et déboucha sur la découverte d'un autre site de désobusage et de liquidation de restes de guerre de l'entre-deux-guerres dans le canton de Spincourt, à environ 8 km au nord-est de la « Place à gaz », mais bien plus imposant que la « Place à gaz » car posssédant des dimensions industrielles. Le secteur de Spincourt fut survolé en 1922 pour des reconnaissances et la prise de photographies aériennes visant spécifiquement le site de désobusage dont les dimensions et l'organisation, malgré l'absence de plan dans les archives consultées, ont pu être reconstituées.

[9] Bausinger, T., E. Bonnaire, E., and J. Preuß, J. (2008). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. Science of the Total Environment* 382: 259–271.

Un jeu de photographies anciennes exceptionnel datant des années 20 (issu de collections particulières, communication personnelle), de la période d'exploitation du site de désobusage, a aussi été rassemblé. Ce corpus donne une vision de ce que fut ce site qui regroupait en fait trois entités, reliées entre-elles par les voies ferrées ayant desservi les batteries allemandes ayant bombardé Verdun durant la Grande Guerre, à cheval sur les communes de Muzeray, Vaudoncourt et Loison. Ce complexe de désobusage désigné par « Clere & Schwander » porte le nom de l'exploitant industriel (deux associés) mandaté par l'Etat pour démolir les munitions entreposées en masse à cet endroit. Les premières recherches historiques entreprises alors montrèrent le caractère exceptionnel de ce site en ce qui concerne le tonnage de munitions chimiques de la Première Guerre mondiale démolies. Il comprenait vers 1922 deux ensemble d'ateliers de démolition (Rampont et Noire Fontaine), et d'un grand terrain d'éclatement (Loison Vaudoncourt).

Un nombre considérable de 1 500 000 projectiles chimiques et 300 000 projectiles explosifs auraient été éliminés au niveau de cet important centre de rassemblement de munitions chimiques ; ces engins provenaient de zone de ramassage et de désobusage de la Picardie, de la Champagne et de Belgique (2e Région militaire alors que la Meuse s'inscrit dans le 6e Région militaire). Contrairement à la « Place à gaz », les entités formant le complexe Clere & Schwander sont inscrits dans un environnement vulnérable (absence d'argiles de couverture au-dessus de la nappe phréatique, et proximités d'eau de surface avec des usages sensibles) et leurs sols, facilement accessibles, font l'objet d'un usage agricole (pâture, culture du maïs, du blé, de l'orge).

Me rendant sur place en janvier 2015, je pus m'apercevoir que les sols agricoles labourés au droit des usines de Noire Fontaine et de Rampont montraient des indices de sévères pollutions en surface. Ces terres étaient constellées par de très nombreux fragments de munitions (dont des fioles en verre initialement présentes au sein d'obus chimiques allemands à *Croix bleue*, encore chargées d'arsines). Localement, les sols renfermaient aussi de fortes densités de fragments centimétriques d'explosifs. Les terrains situés au niveau du polygone d'éclatement de Vaudoncourt Loison étaient pollués par de nombreuses munitions de différents calibres, intègres, déformées ou fracturées, exposant les chargements explosifs à l'environnement. Le Service du déminage de Metz (Ministère de l'Intérieur, Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC)) intervint deux fois après signalement auprès de la Mairie de Loison, de découverte d'engins de guerre. L'une des interventions vit l'évacuation de 1,2 tonne de projectiles. Plus tard, à l'été, avec le retour de la végétation, des lumières dans les champs d'orge et de maïs se firent jour, témoignaient du caractère phytotoxique des pollutions des sols qui inhibaient localement la croissance des plants. Je ne sus qu'en 2022, que les zones incultes situées au droit de l'usine de Rampont étaient connues, cartographiées et inscrites au cadastre en 1997.

Ce site et ses pollutions semblaient avoir été jusqu'alors confinés dans un trou mémoriel, comme effacés de la mémoire collective et des enregistrements administratifs, débouchant, presque 100 ans après la clôture des chantiers de désobusage, sur la découverte fortuite des pollutions de sol dont la gestion technique, administrative et communicationnelle allait s'avérer d'autant plus délicate que leur survenue était inattendue et que les composés chimiques incriminés étaient non seulement d'une grande diversité et toxicité mais surtout totalement inhabituels (polluants couramment désigné d'« exotiques »). La brutale irruption de ces sols dégradés déboucha ici comme la plupart du temps en cas de découvertes fortuites sur des crises politico-médiatiques (cf. Figure 2), sur la mobilisation de gros moyens financiers à engager dans un temps très court pour en évaluer les risques voire, si nécessaire, pour y remédier.

Le Préfet de la Meuse, après avoir pris connaissance des constats patents de pollutions sévères des sols agricoles, prescrivit alors par l'arrêté préfectoral DDCSPP n°2015-074 du 06 juillet 2015, la destruction des récoltes 2015 et la mise sous séquestre des parcelles reconnues polluées en première approche (constats visuels, organoleptiques de pollutions), ou susceptibles de l'être (au regard des éléments historiques à disposition alors, et notamment de l'extension des installations Clere & Schwander), dans l'attente d'analyses contradictoires sur la qualité des denrées alimentaires animales ou végétales produites sur ces terrains. Un démarche d'indemnisation des exploitants agricoles fut mise en place et un processus de recherche de terres de substitution fut initié, qui ne surent toutefois pas atténuer l'onde de choc provoquée au sein de la communauté agricole concernée par cette annonce et ces prescriptions, presque cent ans après les évènements qui ont généré ces pollutions, un monde agricole, attaché à son terroir et ses métiers, dès lors partagé entre attentes de réparation et incompréhension, consternation et résignation.

Fut confiée au BRGM la tâche de mener une Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM, au sens des textes du Ministère en charge de l'Environnement d'avril 2017), un processus d'évaluation de la compatibilité de l'état des milieux environnementaux avec leurs usages actuels constatés, nécessitant la réalisation au préalable de caractérisation des pollutions (diagnostics). Presque sept ans d'investigations, d'études, d'échanges et discussions à différentes strates des instances administratives compétentes concernées furent nécessaires pour solutionner cette situation « *Dans la Meuse, la pollution oubliée de la Grande Guerre empoisonne toujours les sols. Un million et demi d'obus chimiques et 300 000 obus explosifs ont été détruits après 1918 dans le secteur de Muzeray, rendant certaines terres impropres à l'agriculture* » pouvait-on encore lire en titre dans les colonnes du Monde du 06 novembre 2018.

La terre empoisonnée ?

La récolte 2015 de sept exploitations agricoles du Nord meusien a dû être détruite à cause d'une potentielle pollution du sol qui remonterait à la fin de la guerre de 14-18.

Dans le canton de Spincourt, tout le monde le sait, mais personne n'en parle. Et l'omertà a, semble-t-il, gagné toute la Meuse puisqu'il a été vivement conseillé de ne pas ébruiter l'affaire. Sept exploitations seraient concernées à Vaudoncourt, Muzeray et Loison. Les agriculteurs ont reçu la nouvelle comme un coup de massue au début du mois de juillet, en pleine moisson. La direction départementale de la cohésion sociale et de la protection des populations (DDCSPP) s'est présentée sur leurs exploitations pour leur expliquer que leurs productions ne pouvaient plus être commercialisées, jusqu'à nouvel ordre. Par mesure de précaution, le temps que des analyses soient effectuées. En cause? Une pollution qui remonterait à près d'un siècle.

« L'Etat se réveille cent ans après »

Dans un arrêté pris le 6 juillet 2015, la préfecture de la Meuse rapporte que « des activités polluantes de déconstruction et destruction de munitions chimiques et explosives » ont été réalisés dans cette zone située à une trentaine de kilomètres au nord-est de Verdun, à deux pas de la Meurthe-et-Moselle. Des études et prélèvements menés par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) démontrent que plusieurs parcelles situées sur le territoire des communes de Muzeray, Vaudoncourt et Loison affichent la « présence de métaux et de composés organiques toxiques dans le sol ». La DDCSPP et la préfecture de la Meuse ont donc décidé de procéder à des « restrictions sanitaires d'utilisation et de mise sur le marché de productions agricoles végétales issues des parcelles contaminées par des résidus chimiques sur le site Clere & Schwander », le nom donné au périmètre concerné par la contamination potentielle.

Les céréales cultivées cette année dans cette zone ont été détruites, le lait produit par les vaches potentiellement alimentées par ces céréales, collecté tous les deux jours, est jeté depuis le mois de juillet, et celles destinées à l'abattoir restent dans l'étable.

Depuis que ces mesures ont été prises, l'équivalent de 150 000 € de lait aurait déjà été jeté. « Tout ce qu'on produit part à la poubelle », révèle sous couvert d'anonymat l'un des agriculteurs concernés. « L'Etat se réveille cent ans après », déplore-t-il, écœuré. « Il faut avoir les nerfs solides pour supporter ça, surtout en pleine crise agricole. » Les agriculteurs cultivent ces terres depuis plusieurs générations et s'étonnent de la réaction tardive des autorités si danger il y a.

Ce qui étonne également, c'est que cette affaire a été mise sous embargo total depuis plusieurs mois. Il suffit d'évoquer le sujet pour voir aux mines confuses que les interlocuteurs sont embarrassés. Le préfet de la Meuse, contacté à deux reprises via son cabinet, n'a pas donné suite à nos sollicitations.

Léa BOSCHIERO.

Le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) sondait mardi un champ situé entre Muzeray et Vaudoncourt.
Photo ER/Franck LALLEMAND

Non loin de là… « la place à gaz »

Les parcelles concernées par cette restriction sanitaire se trouvent à quelques encablures du lieu-dit tristement baptisé localement « la place à gaz », un carré perdu en forêt de Spincourt où, dans les années 1920, des milliers d'obus chimiques ont été détruits. Dans une étude publiée en 2007, deux scientifiques allemands révélaient la dangerosité toujours effective de ce site.

Près de cent ans après le premier conflit mondial, le sol regorge encore de produits hautement toxiques, des métaux lourds (cuivre, plomb, zinc) mais aussi de l'arsenic. Depuis la révélation de ces conclusions, l'accès à la « place à gaz » a été totalement interdit par arrêté préfectoral.

Alors qu'une suspicion de contamination plane sur des cultures agricoles dans trois villages situés aux portes de Spincourt, la proximité des deux sites interroge. Le 20 juillet 2015, la préfecture de la Meuse prenait d'ailleurs un second arrêté qui interdit « la consommation des poissons et des produits issus de la cueillette et du ramassage sur les parcelles des sites de la place à gaz et de Clere & Schwander ». L'arrêté lie les deux lieux, précisant que « les sites de la place à gaz et Clere & Schwander sont susceptibles d'être contaminés par des composés toxiques et que leur consommation peut présenter un risque potentiel pour la santé. » Toutes ces interdictions pourront être abrogées, « constatant à partir d'analyses complémentaires favorables, qu'elles ne sont plus justifiées pour la protection de la santé publique ».

Dans son premier arrêté du 6 juillet, la préfecture de la Meuse dit attendre « l'obtention de garanties sanitaires sur les productions » pour autoriser à nouveau la commercialisation des productions agricoles cultivées sur le site Clere & Schwander.

Le bureau de recherches géologiques et minières était sur le secteur mardi pour sonder le sol et permettre de localiser des fosses de tir de la Première Guerre mondiale. Le BRGM a été chargé par le ministère de l'Ecologie d'inventorier tous les sites qui présentent les mêmes caractéristiques que ceux situés autour de Spincourt.

L. Bo.

Figure 2 : Extrait du Républicain Lorrain du 17 septembre 2015.

Pourtant, la découverte fortuite de pollutions des sols en lien avec l'éradication de munitions anciennes dans l'entre-deux-guerres dans le canton de Spincourt ne fut pas sans précédent. Il n'est pas à rechercher sur le sol français, mais bien en Allemagne. Le site pollué de Kelsterbach dans le Land de Hesse en Allemagne a été découvert à la fin des années 1980 de façon fortuite, à la faveur des travaux d'extension du terminal fret de l'aéroport de Francfort-sur-le-Main. L'endroit ayant été bombardé par les Alliés durant la Seconde Guerre mondiale, l'ouverture du chantier fut assujettie à la réalisation préalable d'un diagnostic pyrotechnique pour repérer d'éventuelles bombes d'aviation non explosées. Les personnels du service du déminage allemand (*Kampfmittelräumdienst*) déterrèrent alors, à leur grande surprise, des engins inattendus, des projectiles chimiques de la Première Guerre mondiale. Le service du déminage réalisa dès 1986 un diagnostic détaillé du site et procéda à la dépollution pyrotechnique des lieux. Furent ainsi déterrés dans ces conditions 900 obus d'un calibre de 77 mm à 240 mm, 371 grenades à main, 8 000 détonateurs d'obus et 60 000 gaines d'éclatement. 40 000 m^2 de terrains furent reconnus pollués par les produits chimiques, les métaux, selon les standards allemands. Les sols localement titraient à plus de 2 000 $gAs.kg^{-1}$. Les eaux souterraines étaient aussi touchées, notamment par les composés nitroaromatiques proches du TNT (jusqu'aux valeurs de concentration de 900 $mgTNT.L^{-1}$).

Lors des travaux de dépollution par excavation engagés en 1996, 11 tonnes de toxique de guerre, de sels de diphénylarsine ayant chargé les obus à *Croix bleue* allemands, furent retirées du sol. Les quantités de terre et de matériaux pollués par l'arsenic, le mercure, les composés nitroaromatiques (NAC, acronyme anglo-saxon pour *Nitroaromatic Compounds*) étaient considérables. En conséquence, 237 000 tonnes furent excavées au rythme de 5 000 tonnes par jour pour être ensuite réservées, analysées et dirigées vers les filières de traitement ad hoc. Un dispositif de fixation par pompage & traitement des eaux souterraines fut aussi mis en place afin de contenir la pollution de la nappe phréatique. Les coûts des opérations de dépollution s'élevèrent à 50 millions de Mark allemands (~25 M€).

S'il ne fait aucun doute au regard des pollutions spectaculaires et sévères des sols de la « Place à gaz », du complexe de désobusage Clere & Schwander ou encore de Kelsterbach que le premier conflit mondial a indirectement, par l'éradication dans l'entre-deux-guerres de restes hérités du conflit, contribué à modifier et dégrader localement et ponctuellement notre environnement, les liens causaux entre l'occurrence à l'échelle régionale dans le quart nord-est de la France des ions perchlorate dans les EDCH et la Grande Guerre restent hypothétiques.

Les découvertes fortuites, subites, soudaines et subies de pollutions sévères des sols liées aux démolitions de munitions anciennes de 1914-1918, attestent incontestablement d'une lacune de traces et d'enregistrements historiques de ces activités. L'absence de réponse étayée sur le plan scientifique concernant les origines du marquage des eaux souterraines par les ions perchlorates révèlent d'autres lacunes, historiques, et aussi de caractérisation environnementale, concernant l'impact sur les eaux, la nature et l'usage des matières perchloratées en lien avec la Grande Guerre.

Se pose donc en creux avec ces deux situations, la question plus générale du caractère polluant des grands conflits armés historiques, des guerres modernes comme acteurs d'anthropisation rémanente de notre environnement actuel, et notamment des milieux souterrains. Un état des connaissances des relations entre guerre et environnement est proposé dans ce qui suit.

2. Environnements de guerre, environnements en guerre

2.1. VIOLENCES GUERRIERES ET BRUTALISATION[10] ENVIRONNEMENTALE AU XXE SIECLE

Faire la guerre est une des activités humaines les plus anciennes. La guerre est un recours à la force, généralement armée, entre plusieurs collectivités organisées, clans, factions ou états pour contraindre la partie adverse à se soumettre à sa volonté. Elle est, selon la définition du célèbre théoricien de la guerre *Carl von Clausewitz «[…] un acte de violence dont l'objet est de contraindre l'adversaire à se plier à notre volonté*[11] » et en ce sens « *La guerre n'est que la simple continuation de la politique par d'autres moyens*[12] ». « *La guerre est un choc de volonté et de moyens*[13] ». La déconvenue de l'offensive éclair russe en Ukraine en février 2022 illustre que ce diptyque énoncé par Clauzewitz ne saurait suffire pour qualifier la guerre. Vladimir Poutine régla avec le recours à la conscription la question quantitative, les effectifs et moyens, mais pas celle qualitative, des compétences[14].

La guerre se joue sur une temporalité donnée, jalonnée par une succession de séquences d'actions combattantes et ces moments paroxystiques où culmine la violence que sont les batailles, et d'actions non combattantes (mais tout aussi essentielles), sur des terrains et plus généralement dans des espaces, formant le « théâtre des opérations », l'environnement de la guerre. L'environnement est l'ensemble des éléments physiques, chimiques, naturels et artificiels, et biologiques qui entourent les êtres humains et leurs activités guerrières. Il est constitué par différents compartiments aux interfaces desquels s'opèrent de nombreuses interactions parmi lesquels le sol, les eaux souterraines. Les eaux de surface, les eaux marines, leurs sédiments et l'air atmosphérique forment d'autres compartiments de l'environnement.

La guerre possède un environnement qui lui est singulier dans lequel elle se déploie, le modifiant au même moment par sa simple expression. Guerre et environnement s'interpénètrent par leurs dynamiques réciproques, multiples et protéiformes. La guerre est contrainte par son environnement comme elle le modifie à son tour. Les militaires ont d'abord cherché à identifier dans l'environnement du champ de bataille ce qui était bénéfique ou préjudiciable, hostile, à la conduite des opérations militaires puis à tirer tactiquement profit de cet environnement pour se défendre ou attaquer. L'usage militaire de l'eau par l'inondation artificielle en Belgique en 1914 ou en Ukraine en 2023, la recherche des sols meubles pour creuser abris et tranchées ou encore pour avancer sous terre pour saper l'adversaire et se dissimuler, se dérober au feu et aux regards en surface durant la Grande Guerre, en Syrie ou à Gaza, en sont quelques exemples historiques et d'actualité[15].

---

[10] Mosse, G. L. (1990). *Fallen soldiers : reshaping the memory of the world wars*, New York, Oxford University Press, 1990, 264 p. (ISBN 978-0-19-507139-9 et 978-0-195-06247-2, OCLC 815626741), traduit en français en 1999 sous le titre *De la Grande Guerre au totalitarisme. La brutalisation des sociétés européennes*.

[11] Carl von Clausewitz, (1832). *De la Guerre*. Edition abrégée et présentée par Gérad Chaliant. Nouvelle traduction de l'allemand par Laurent Murawiec. Perrin. 2018.

[12] Ibid.

[13] Anquez, M. (2022). « *Art de la guerre. Guerre en Ukraine. Les erreurs russes à la lumière de « Barbarossa » ». Défense & Sécurité internationale*, n° 162. Novembre-Décembre 2022. p.73.

[14] Goya, M. (2022). « *1918 en Ukraine ». Défense & Sécurité Internationale* n°162. Novembre-Décembre 2022. pp 56-59.

[15] Hubé, D. (2017). *1914-1918 Tremblements de guerre - Les géologues au coeur de l'histoire*. BRGM Editions.

L'environnement ne fut longtemps qu'à peine effleuré par les guerres. Les modifications environnementales en lien avec des confrontations armées restèrent très locales, superficielles, les combats ne concernant que des aires géographiques restreintes, sur de courtes périodes de temps et avec un nombre limité de combattants usant principalement de l'arme blanche ou d'armes à feu portatives et d'une artillerie rudimentaire sans projectile explosif. La guerre a longtemps été menée par des « *raids sans cesse recommencés en territoire adverse […]* », par des coups-de-main et l'embuscade[16].

Mais la magnitude et la diversité des conséquences environnementales des guerres n'ont eu de cesse de croitre significativement et continuellement[17] au cours de l'Histoire avec l'envolée de la violence guerrière, des dimensions des armées en présence et surtout de la puissance d'armes qui se sont aussi diversifiées et spécialisées. On assista avec le XIXe siècle, à l'entrée en scène sur le théâtre des opérations d'un acteur violent de l'anthropocène naissant : la guerre.

Un premier seuil dans la brutalité guerrière fut en effet franchi avec les guerres napoléoniennes du XIXe siècle qui ont inauguré la massification de la guerre, avec les premières confrontations à grande échelle entre des armées nationales dont les effectifs étaient en partie issus de la conscription. La technicisation de la guerre initiée à la fin du XIXe siècle sous l'impulsion de progrès technologiques et de l'armement et le recours massif à cet arsenal d'une puissance inédite marquèrent avec la Première Guerre mondiale (1914-1918) l'entrée dans l'ère des guerres modernes industrielles et mécanisées. La Grande Guerre a été la première rupture anthropologique dans les relations de l'Homme avec son environnement car jamais encore auparavant l'environnement n'avait été si profondément et si durablement bouleversé en si peu de temps. Cette guerre d'une violence inouïe fut totale, se gagnant ou se perdant au front ou à l'arrière en investissant aussi tous les compartiments de l'environnement. Les airs, les mers, les sols et le sous-sol, plaines et montagnes. La Grande Guerre a aussi été le premier choc anthropologique du XXe siècle, une inflexion dans l'idée du progrès, une mise à mal de cette croyance aveugle « positiviste » que sciences et techniques étaient entièrement vouées au bien-être de l'Humanité. Cet effondrement de la croyance en un monde meilleur inspira la célèbre phrase de Paul Valéry « *Nous autres, civilisations, nous savons maintenant que nous sommes mortelles*[18] ». Elle fut enfin un point d'inflexion dans l'acte guerrier qui se désincarna. Donner la mort se fit alors à distance, abstraite, sans se voir.

1914-1918 fut cette catastrophe inaugurale d'un XXe siècle barbare, la « *catastrophe originelle du XXe siècle*[19] ».

L'explosion de la première bombe nucléaire le 16 juillet 1945 au *Trinity Test Site* près d'Alamogordo dans le désert du Nouveau Mexique signa l'entrée dans l'ère nucléaire et de l'uranium, l'apparition de bombes nucléaires et thermonucléaires d'une puissance inouïe avec en corollaire la menace de leur usage durant la Guerre froide, un équilibre de la terreur entretenu par la perspective d'auto-destructions à grande échelle quasi-instantanées et d'effets à longs termes, la perspective de mort à petit feu, par les radiations.

---

[16] Audoin-Rouzeau, S. (2008). *Combattre. Une anthropologie Historique de la guerre moderne (XIXe-XXIe siècle)*. Editions du Seuil.

[17] Hupy, J.P. Koehler, T. (2012). *Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. Geomorphology* 157-158.

[18] Paul Valéry, P. (1919). *La Crise de l'esprit*.

[19] Kennan, G. F. (1979). *The Decline of Bismarck's European Order. Franco-Russian Relations 1875-1890*. Princeton: Princeton University Press, 1979. https://doi.org/10.1515/9780691218274.

La Seconde Guerre mondiale a été le second choc du XXe siècle « *non pas tellement par la prise de conscience de l'extermination des juifs d'Europe, bien plus tardive, mais avec l'explosion de la bombe atomique qui ouvrait la possibilité d'une autodestruction des sociétés humaines*[20] ».

Les propriétés fissiles de l'uranium ne furent pas les seules caractéristiques de ce métal lourd qui trouvèrent des usages militaires. L'uranium ^{238}U, ou « uranium appauvri » (DU, *Depleted Uranium* pour les Anglo-saxons) est un déchet issu de l'enrichissement de l'^{235}U du combustible nucléaire. Ce métal bon marché, extrêmement dur et dense (19 tonnes / m^3 soit 65% fois plus dense que le plomb) est idéal pour entrer dans la composition des projectiles à longue portée et à très haute vitesse (> 5 000 km.h^{-1}) (dénommés « pénétrateurs cinétiques ») qui, par leur seule énergie cinétique, peuvent transpercer les blindages et armures des chars modernes. Par ailleurs, le métal est pyrophore : il se volatilise à l'impact en aérosols prenant instantanément feu à très haute température (2 000 °C) ne laissant aucune chance de survie à l'équipage. Cet uranium est légèrement radioactif (40% moins que le métal parent) mais est surtout extrêmement toxique. Utilisé notamment lors des guerres du Golfe[21], dans les Balkans en Ex-Yougoslavie[22], en Afghanistan, il a été à l'origine d'intoxications sévères des populations civiles mais aussi des combattants, qu'ils soient ennemis ou de son propre camp, exposés car évoluant à proximité des points d'impact.

Durant les deux conflits mondiaux, à l'exception des épisodes de destructions volontaires par l'application de la tactique dite de la Terre brûlée, l'environnement n'était pas délibérement visé mais le combattant qui y évoluait. Il fallut attendre la guerre du Vietnam (1963-1975) et la guerre froide pour qu'un autre tournant soit amorcé. L'environnement fut intentionnellement ciblé par des actions militaires pour en déloger le combattant[23]. De la prise de conscience de la dimension environnementale de la séquelle de guerre causée par cette politique émergèrent alors le nom et le concept « d'écocide ». Dans *Ecocide in Indochina* (1970)[24], Barry Weisberg définit l'écocide comme une stratégie visant à détruire l'ennemi en s'en prenant en partie à lui, mais aussi à tout son environnement naturel, à ce qui lui permet de subsister[25]. Les dommages graves et durables causés à l'environnement à des fins militaires sont alors commis délibérément et en connaissance de cause. L'objectif est d'affaiblir ou de neutraliser les capacités combattantes de l'adversaire en le privant de toute ou partie de ses ressources et/ou des composantes environnementales dont il tire parti pour conduire la guerre, attaquer ou se défendre. La guerre du Vietnam joua aussi comme un levier pour faire évoluer le droit international avec notamment la signature en juin 1977 du Protocole additionnel à la Convention de Genève de 1949, qui, dans son Article 55, (i) prohibe les atteintes environnementales à des fins de représailles, et (ii) demande à ce que les milieux naturels soient préservés des dommages étendus, sévères et de longs termes. Il fut suivi par l'*Environmental Modification Convention* (ENMOD), la convention internationale sur l'interdiction de l'usage militaire et hostile des techniques de modification environnementale qui entra en vigueur le 5 octobre 1978, mais ratifiée par seulement 20 pays.

---

[20] Audoin-Rouzeau, S. (2020). *Nous ne reverrons jamais le monde que nous avons quitté il y a un mois*. Médiapart, 12 avril 2020.

[21] Bema, H., Bou-Rabeeb, F. (2004). « Environmental and health consequences of depleted uranium use » in *The 1991 Gulf War. Environment International* 30, 123– 134.

[22] United Nations Environment Programme, UNEP (2003). *Depleted Uranium in Bosnia and Herzegovina. Post-Conflict Environmental Assessment*. Revised Edition: May 2003.

[23] *Ibid.*

[24] Weisberg, B. (1970). *Ecocide in Indochina. The ecology of war Paperback*, January 1, Canfield Press; First Edition.

[25] Arte Télévision *Les Idées larges*. *Comment la guerre change notre rapport à l'environnement*, par Fabien Locher. EHESS, propos recueillis par Caroline Pernes publié le 09 décembre 2022.

Les séquelles environnementales des guerres sont une réalité sans équivoque; la magnitude et la typologie de ces modifications sont étroitement liées à l'importance du déploiement et de l'usage d'armes de grande puissance, à l'intensité des combats, leur densité (violence des combats sur une aire géographique restreinte), leur dynamique (évolution spatiale et temporelle des champs de bataille) et leur durée, et les compartiments environnementaux investis par les forces armées (sol, sous-sol, eaux et airs). Peu de phénomènes naturels géomorphologiques, qu'ils soient strictement géologiques et/ou biogéomorphologiques, sont capables à l'instar des guerres modernes, inaugurées par la Première Guerre mondiale, de modifier et durablement perturber l'environnement.

Les effets environnementaux des guerres modernes sont polymorphes et peuvent être historiquement répartis en trois catégories : (i) les destructions et les modifications environnementales en lien avec l'usage de l'armement, mais aussi son abandon voire sa liquidation, (ii) la consommation importante des ressources (eau, bois, nourriture, etc.) dans les zones de combat pour les besoins des armées et (iii) la consommation indirecte des ressources minérales et énergétiques des complexes militaro-industriels pour alimenter l'effort de guerre[26]. L'impact des guerres sur l'environnement naturel et humain est généralement négatif, avec des effets sur les courts et/ou longs termes, immédiats ou différés, locaux ou couvrant une importante extension géographique. Dans de nombreux cas, ces effets sont sévères, persistants, irréversibles[27].

2.2. GUERRES POLLUANTES. UNE REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.2.1 Usage des armes. Empreintes de la guerre (1914-1918).

Les atteintes environnementales en lien avec les faits de guerre sont d'abord physiques, les ruines, la destruction des sols et le bouleversement de la morphologie de surface (paysages) en sont les expressions les plus immédiates et visibles. L'Artillerie infligea plus de 70% des pertes et blessures durant la Grande Guerre et raya des cartes en quelques semaines des villages entiers, comme l'auraient fait 40 000 à 80 000 années d'érosion naturelle, des destructions « *comme des siècles d'abandon*[28] ».

Ces transformations physiques, géomorphologiques, visibles et parfois spectaculaires (comme à la butte de Vauquois, dans le département de la Meuse) conduisant à la naissance de néo-environnements anthropiques, ont fait l'objet de travaux de recherche par des géographes et géomorphologues, en établissant notamment des comparaisons entre les paysages cratérisés de la forêt de Verdun (Hupy et al., (2006)[29], Hupy et al., (2008)[30]) et ceux de la jungle du Vietnam (Hupy et al., (2012)[31]).

---

[26] Hupy, J.P., Koehler, T. (2012), *op. cit*.

[27] Gidarakos, E. (2015). *War and environmental impacts. Waste management* (New York, N.Y.). 35. 1-2. 10.1016/j.wasman.2014.10.007.

[28] Dorgelès, R. (1923). *Le Réveil des Morts*. Albin Michel Editeur. Paris. p.20.

[29] Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2006). *Introducing 'bombturbation,' A Singular Type of Disturbance and Mixing. Soil Science 171*, *no. 11* (November 2006): 828.

[30] Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2008). *Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France. Geoderma 145* (2008): 37-49.

[31] Hupy, J.P., Koehler, T. (2012), *op. cit.*

D'autres enfin, procédèrent à une cartographie détaillée de la surface des sols des anciens champs de bataille de l'Argonne et de Champagne par l'imagerie LiDAR[32], en catégorisant et hiérarchisant chaque type de formes, afin notamment de comprendre leurs organisations spatiales (à la lumière des évènements historiques ayant eu lieu sur ces territoires) et de mesurer leur degré de conservation (Brenot et al., (2017)[33]). Cet outil d'imagerie aérienne LiDAR a été mis à profit, en combinaison avec des investigations de terrain (sondages et réalisation de profils pédologiques), des recherches sur sources d'archives et des études géoarchéologiques, afin d'évaluer, en Argonne, les volumes de terre déplacés par (i) le creusement des tranchées et (ii) les détonations des projectiles. Taborelli et al., (2017)[34] démontre ainsi, que ceux-ci s'élèvent entre 1 000 et 2 000 $m^3.ha^{-1}$.

L'Artillerie a durablement et profondément modifié des territoires, bouleversé des paysages (avec apparition de surfaces en peau d'orange (ou « polémo-faciès[35] »), brassé les sols sur des profondeurs de plusieurs mètres (phénomène désigné par Hupy et al., (2006) de « *bombturbation*[36] » en écho au brassage naturel des sols par le gel « cryoturbation » ou encore par les organismes vivants fouisseurs « bioturbation »), sous l'effet de forces de puissances et magnitudes quasiment géologiques. Hupy et al., (2012)[37] découvre que durant la Grande Guerre, au moins 20 millions de cratères d'impact ont été générés par l'Artillerie sur le front occidental, d'autres estiment que ce nombre serait supérieur à 50 millions (ce qui apparaît cohérent avec le dénombrement du nombre de tirs des pièces lourdes et de campagne)[38].

Le brassage des sols et l'empreinte paysagère sont multifactoriels (i) de l'usage massif d'armes nouvelles et puissantes, (ii) de la durée de la guerre, (iii) du caractère quasi-statique d'une ligne de front occidentale s'étendant sur 750 km et enfin (iiii) de la diversité des compartiments environnementaux sollicités et/ou investis pour la première fois par ou pour les combats. Dans les secteurs où se déroulèrent des combats souterrains, offensifs comme défensifs, au moyen (i) de systèmes complexes et étagés de galeries, (ii) de puissantes charges explosives souterraines (fourneaux) les terrains ont été intensément et profondément affouillés et aussi fracturés, déstructurés et localement déplacés par les puissantes détonations souterraines (Hubé, 2017)[39]. Lewis et al., (2013)[40] met en exergue que les détonations de projectiles à l'impact modifient aussi la structure des sols par compaction et fracturation, pouvant modifier les propriétés hydrauliques du milieu souterrain et les conditions de la recharge des nappes phréatiques.

---

[32] Acronyme anglo-saxon désignant *Light Detection And Ranging* ou *Laser imaging Detection And Ranging* (soit en français « détection et estimation de la distance par la lumière » ou « par laser »).

[33]Brenot, J., Saulière, N., Léty, C., Taborelli, P., Zélie, B., Blondeau, R., Devos, A., Desfossés, Y. (2017). *How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. Geoarchaeology*. 2017;1–15.

[34] Taborelli, P., Devos, A., Laratte, S., Desfossés, Y. Brenot, J. (2017). *Typologie et organisation spatiale des « polémo-formes » de la Grande Guerre révélées par l'outil LiDAR et les plans directeurs. Application à la Champagne et à l'Argonne. Site de la revue de Géographie Historique,* Volume 10.

[35] De Polémos personnification ou incarnation divine de la guerre dans la mythologie grecque. Son pendant romain était Bellum.

[36] Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2006), *op. cit.*

[37] Hupy, J.P. Koehler, T. (2012), *op. cit.*

[38] Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2006), *op. cit.*

[39] Hubé, D. (2017), *op. cit.*

[40] Lewis, J., Burman, J. Edlund, C., Simonsson, L., Berglind, R., Leffler, P., Qvarfort, U., Thiboutot, S., Ampleman, G., Meuken, D., Duvalois, W., Martel, R., Sjöström, J. (2013). *The effect of subsurface military detonations on vadose zone hydraulic conductivity, contaminant transport and aquifer recharge. Journal of Contaminant Hydrology* 14. p 8–15.

Certini et al., (2013) souligne l'importance de l'affouillement des sols par le creusement des fortifications de circonstance (abris, boyaux et tranchées) « *Considerable human disturbances to soil for defensive purposes was implied by the wide trench systems on the Western Front* ».

Comme le démontre Hupy (2012)[41] avec la cratérisation de ces « polémo-sols » au droit des anciens champs de bataille intensément pilonnés, le libre ruissellement des eaux météoriques sur les coteaux, comme en Meuse, est entravé au profit de l'infiltration ; c'est ainsi qu'on vit s'élever le niveau des nappes et se créer des zones humides néoformées après la guerre. La destruction des sols agricoles, non labourés, se compactant, eut pour conséquence une perte notable de leur fertilité dans les premières années qui suivirent l'armistice du 11 novembre 1918. Les bombardements rompirent le long processus de pédogenèse. Les sols dégarnis de végétation furent colonisés par des espèces robustes, pionnières, comme…le coquelicot, une plante à la couleur rouge sang devenue symbolique et emblématique du souvenir britannique de la Grande Guerre.

L'usage massif de projectiles de tous calibres (des armes portatives à ceux d'obus d'artillerie lourde) durant la Grande Guerre et l'introduction dans les sols de projectiles et de fragments métalliques de toutes tailles pendant les bombardements répétés, ont amené la communauté scientifique a s'interroger sur la pollution des sols par les métaux qui étaient visibles sur les champs de bataille.

Celi (1991)[42], en étudiant l'ancien champ de bataille du front alpin du plateau d'Asiago (Vénétie, Italie), constate que les cratères générés par les tirs, de plus de 1,5 mètre de profondeur se transforment avec le temps en doline dans cet environnement karstique[43]. Les cavités karstiques étudiées par Celi (1991), dans lesquelles se forme du guano de chauve-souris, s'avèrent être nettement polluées par les métaux lourds et en particulier le cuivre, le cadmium et le zinc. Cette pollution est attribuée aux grandes quantités de munitions qui avaient été enfouies dans ces cavités après-guerre et au lessivage par les eaux de pluies des multitudes d'éclats, de ferrailles qui jonchaient l'ancien champ de bataille. Pirc & Budkovic (1996)[44] ont étudié la qualité des sols de surface sur des parcelles du front de Soca (actuelle Slovénie) qui a été durant la Grande Guerre, avec 11 offensives italiennes et une offensive austro-hongroise (Simic, 1996)[45], l'une des sections les plus actives du front austro-hongrois contre l'Italie. Ils soulignent l'importance de la pollution des sols par la grande quantité de fragments métalliques de dimensions submicroscopiques à métriques.

Ces auteurs rapportent que les teneurs (en mg par kg de sol) en cuivre (Cu), mercure (Hg), plomb (Pb), antimoine (Sb) et zinc (Zn) sont plus au moins anormalement élevées dans les sols (la qualité des sols montre un écart par rapport à l'état normal, non perturbé et habituellement rencontré de l'environnement, ces métaux étant naturellement présents dans les minéraux formant roches et sols).

---

[41]Certini, G., Scalenghe, R., and Woods, W.I. (2013). *The impact of warfare on the soil environment. Earth-Science Review* 127 (2013): 2.

[42] Celi, M. (1991). *The impact of bombs of World War 1 on limestone slope of Monte Grappa*. Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas -I.G.U.- U.I.S.-Italy 15-27 Sept. 1991 ; Quaderni del Dipartimento di Geografia n. 13. 1991 -Università di Padova. pp. 279-287.

[43] Dépression circulaire liée à l'érosion et la dissolution des calcaires en contexte karstique.

[44] Pirc, S., Budkovic, T. (1996). *Remains of World War I geochemical pollution in the landscape*, in Richardson, M. (ed) *Environmental xenobiotics*. Taylor & Francis, Hertfordshire, pp 375-418.

[45] Simic, M. (1996). *Po sledeh Soške fronte. Založba Mladinska knjiga*, Ljubljana.

Souvent et al,.(2001)[46] a complété ces recherches par l'étude de la nature des fragments, des modalités de corrosion selon la nature physico-chimique des sols et des phases minérales générées par les phénomènes de corrosion, sur deux stations d'étude et des surfaces restreintes de 5 X 5 m. Il démontre que le plomb et l'antimoine[47] sont issus des billes des obus à balles (*Shrapnel*), le zinc et le cuivre du laiton des étuis de cartouches ou de fusées d'artillerie. Baba et al., (2004)[48] a réalisé le même type de travaux de recherche, sur une surface restreinte réputée avoir été sévèrement bombardée durant le premier conflit mondial. L'équipe a retenu la péninsule de Gallipoli, dans le détroit des Dardanelles (actuelle Turquie) où, suite au débarquement allié (essentiellement des troupes des forces expéditionnaires impériales de l'ANZAC (*Australian New Zealand Army Corps*)) d'avril-mai 1915, se sont déroulés d'âpres combats opposant les alliés commandés par Churchill aux troupes turques sous le commandement de Mustafa Kemal pour le contrôle du détroit. L'opération s'est soldée par 450 000 morts et par un fiasco militaire avec le retrait des troupes alliées en décembre 1915. L'étude géochimique s'est focalisée sur les métaux et métalloïdes entrant dans la composition des enveloppes et fusées des projectiles. Les teneurs mesurées en arsenic (As), cadmium (Cd), cuivre (Cu), chrome (Cr), cobalt (Co), manganèse (Mn), nickel (Ni), plomb (Pb), strontium (Sr), vanadium (V), et zinc (Zn) s'inscrivent dans les gammes de celles des sols agricoles. Les auteurs avancent pour expliquer cette absence d'anomalie géochimique l'hypothèse du rôle joué par les propriétés drainantes des roches de l'Oligocène-Miocène, de la terrasse du Pléistocène formée d'un alluvium sablo-limoneux et par le ruissellement, ayant favorisé le lessivage et l'évacuation de la charge métallique introduite dans les sols. Une équipe de chercheurs géochimistes belges a étudié (Van Merveinne et al., 2008[49]) la qualité des sols de surface dans la région de Ypres (Belgique) en échantillonnant sur une superficie de 3 144 km^2 les sols de surface pour en analyser les métaux et métalloïdes (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, et Zn). La teneur médiane en cuivre issue du jeu de données s'élève à 18 $mgCu.kg^{-1}$ dans un environnement pour lequel la médiane du fond géochimique non perturbé serait de 12 $mgCu.kg^{-1}$. Van Meirvenne et al., (2008) en déduisent que 2 800 tonnes de cuivre auraient été introduites dans les 50 premiers centimètres de la surface étudiée. Ces deux valeurs sont très proches au regard des incertitudes des Limites de Quantification (LQ).

Une étude plus récente (Meerschman et al., 2011) [50] réalisée sur la base de 731 points d'échantillonnage dans le secteur d'Ypres montre clairement que la distribution spatiale des teneurs en chrome (Cr) et en nickel (Ni) est dépendante des variations de la texture du sol, alors celle des teneurs en plomb (Pb) et en zinc (Zn) est directement en lien avec l'historique des combats de la Première Guerre mondiale. Les principales conclusions de ces études sont qu'il n'existe pas sur le secteur d'étude de pollution généralisée des sols à l'échelle régionale mais que localement peuvent apparaître des anomalies en plomb et cuivre en relation avec les particules métalliques introduites dans les sols lors des combats de la Grande Guerre.

Plus récemment Williams et al., (2022), ont, à la faveur d'une étude sectorielle sur une petite parcelle boisée de l'ancien champ de bataille du Pas-de-Calais, où se déroulèrent de violents duels d'artillerie durant la Première Guerre mondiale, démontré un enrichissement des sols en plomb et cuivre dont la qualité s'écarte du fond géochimique local.

---

[46] Souvent, P., Pirc, S. (2001). *Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities. Environmental Geology* 40 (3).

[47] L'antimoine est un durcisseur du plomb dans l'alliage Pb/Sb.

[48] Baba, A., and Deniz, O. (2004). *Effect of warfare waste on soil: a case study of Gallipoli Peninsula (Turkey). International Journal of Environment and Pollution* 22*:* 657–675.

[49] Van Meirvenne, M., T. Meklit, S. Verstraete, M. De Boever, F. Tack. (2008). *Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres? European Journal of Soil Science* 59: 372–379

[50] Meerschman, E., Cockx, L., Monirul Islam, M., Meeuws, F., Van Meirvenne, M. (2011). *Geostatistical Assessment of the Impact of World War I on the Spatial Occurrence of Soil Heavy Metals*. AMBIO.

L'originalité de l'étude est d'avoir procédé sur ce secteur très restreint du front à un échantillonnage des sols en discriminant ceux provenant d'une part des fonds de cratères d'impacts de ceux d'autres part prélevés hors des cratères.

2.2.2 Liquidation des Restes Explosifs de Guerre (REG). Une empreinte de la sortie de la Première Guerre mondiale.

Des travaux de recherche menés dans les années 2000 par une équipe de géographes et géochimistes de l'Université de Mayence (Allemagne) démontrent que la genèse de pollutions des sols en lien avec les munitions de la Première Guerre mondiale déborde de la date du cessez-le-feu du 11 novembre 1918. Des munitions, matériels et matières explosibles et agressives furent abandonnés en quantité à la fin des hostilités puis furent démolies. Ces opérations de liquidation des Restes Explosifs de Guerre (REG), menées à l'échelle industrielle dans l'après-guerre, s'avérèrent extrêmement polluantes localement.

Le qualificatif de Restes Explosifs de Guerre (REG) désigne dans le droit international et humanitaire actuel « *les munitions non explosées et les munitions explosives abandonnées* » selon le Protocole de l'Organisation des Nations Unies (ONU) relatif aux Restes Explosifs de Guerre (Protocole V à la Convention CAC de 1980), adopté le 28 novembre 2003. Il s'agit de « *toutes les munitions potentiellement explosives qui demeurent après un conflit armé. Cette catégorie comprend les munitions non explosées (UXO), les munitions abandonnées, les pièges, les engins explosifs improvisés. [...] Le droit international ne considère pas les mines comme des Restes Explosifs de Guerre, car ces dispositifs font l'objet de deux conventions internationales distinctes : le Traité sur l'interdiction des mines antipersonnel et la Convention sur certaines armes classiques (protocole V)* ». Si les mines terrestres ne sont pas concernées car inexistantes durant la Première Guerre mondiale, la définition de REG peut être étendue aux engins abandonnés, tirés ou non, à chargement non explosifs comme les projectiles à balles, incendiaires, fumigènes, chimiques, artifices pyrotechniques (torches et signaux) et autres pétards. Les REG, objets manufacturés, s'assimilent donc à des déchets dès lors qu'ils sont voués à l'abandon, à la destruction sans valorisation des leurs constituants. Selon l'Article L541-1Version en vigueur du 03 juillet 2003 au 19 décembre 2010 du Code de l'Environnement (Modifié par Loi n°2003-591 du 2 juillet 2003 - art. 31 (V) JORF 3 juillet 2003) « *Est un déchet au sens du présent chapitre tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ».

Des recherches historiques ont été menées par l'Université de Mayence pour le compte du Ministère fédéral de l'Environnement (*Umweltbundesamt*) visant les opérations de liquidation des REG en Allemagne dans l'entre-deux-guerres. Preuss et al. (2002)[51] démontrent l'existence de sites de destruction de REG d'échelle industrielle dans l'entre-deux-guerres, en particulier dans le nord de l'Allemagne. Les méthodes de rebutage des REG utilisées sont décrites ; les études historiques détaillées sont assorties d'investigations exploratoires d'orientation sur les sols qui ont été diligentées sur cinq sites. Deux ateliers de démolition étaient situés au sein d'usines de production de munitions et d'explosifs en exploitation durant la guerre.

[51] Preuß, J., Eitelberg, F., Albrecht, G., Mauder, S., Dehner, U., Laskowsi, S. (2002) *Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und -vernichtung nach dem Ersten Weltkrieg*. Umweltbundesamt. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 299 76 240. UBA-FB 000293. Texte 49 / 2.

Les conclusions de cette recherche sur le sol allemand ont orienté les recherches de ces chercheurs en Belgique et en France où de grandes quantités de munitions avaient été utilisées, mais aussi, après-guerre, éliminées, dans des proportions encore jamais vues auparavant.

Bausinger et al., (2005)[52] a caractérisé les sols de surface [0-20 cm] d'une aire de brûlage (*Burning Ground*) pour la destruction de munitions (dont des projectiles chimiques allemands à arsine) à Poelkapelle / Westroozebeke en Flandre occidentale (Belgique). Le brûlage (*Open-Burning*, OB) à l'air libre consistait à décharger les projectiles de leur contenu par la destruction du chargement par les hautes températures d'un foyer. L'étude montre l'occurrence dans ces sols agricoles (plantés de maïs) de teneurs localement très élevées en arsenic (> 1 $gAs.kg^{-1}$) et en plomb (jusqu'à 4,3 $gPb.kg^{-1}$). Les composés organo-arséniés (toxiques de guerre émétisants) ont aussi été quantifiés dans quatre échantillons à des teneurs maximales de 40 $mg.kg^{-1}$ (pour la triphénylarsine). Les NAC typiques des explosifs allemands de la Première Guerre mondiale ont aussi été mesurés à l'état de traces, à des teneurs n'excédant pas 14 $mg.kg^{-1}$ (avec le 1,3-dinitrobenzène). L'auteur conclue qu'il existent des sites de démolition de munitions abandonnés autour du front occidental de la Grande Guerre, en France et en Belgique qui peuvent être pollués par le cortège de polluants mis en évidence dans Bausinger et al., (2005). Les terrains où auraient été opérés les brûlages d'obus chimiques seraient impropres à des usages agricoles et que d'autres investigations seraient nécessaires pour avoir un aperçu plus exhaustif des pollutions. Ces teneurs dans les sols d'un environnement sensible et agricole à Westroozebeke laissent indifférentes.

C'est ainsi qu'un second site de destruction de munitions chimiques de l'entre-deux-guerres a été étudié par le même auteur (Bausinger et al., (2007)[53]). Il s'agit du site dit de la « Place à gaz », en forêt de Spincourt (commune de Gremilly, département de la Meuse), à 20 km au nord-est de Verdun. Cette clairière dépourvue de végétation (du fait des niveaux extrêmes de pollution) de 1 000 m^2 environ, aux sols noircis recouverts de scories et fragments métalliques correspond à une ancienne aire de brûlage d'obus chimiques. 200 000 obus allemands arséniés dits à *Croix bleue* auraient été neutralisés et démolis sur ce site par OB dans l'entre-deux-guerres. Ce site très médiatisé a longtemps cristallisé sur lui la question de la pollution héritée de la Grande Guerre, s'agissant du seul site connu du grand public où cette dernière est visible. Bausinger et al. (2007)[54] démontre que le sol correspond à une couche pluri-décimétrique de résidu de combustion des obus allemands à arsine. Les teneurs en arsenic et zinc sont extrêmes avec respectivement des maximas à 176 $mgAs.kg^{-1}$ et 133 $mgZn.kg^{-1}$ MS.

Les composés organo-arséniés n'ont pas été détectés et les NAC quantifiés à des teneurs modestes dans les sols (avec un max de 14,7 $mg.kg^{-1}$ MS) et les eaux porales (avec un max à 13,5 $\mu g.L^{-1}$). Des concentrations élevées en ions chlorate (71 $mgClO_3^-.L^{-1}$) ont aussi été mesurées dans ces eaux. Malgré la nature argileuse du sol (développé sur les argiles noires du callovo-oxfordien) et la forte capacité de sorption de ces sols pour les métaux, des teneurs en arsenic élevées sont encore mesurées à deux mètres de profondeur compte tenu de la saturation de la capacité de sorption par la grande quantité d'arsenic mobile présente dans les résidus de brûlage étendus sur le sol. Le site est libre d'accès et est occasionnellement fréquenté (présence d'une cabane de chasseur, promeneurs, etc.). Les teneurs en arsenic (toxique et cancérigène) sont telles que potentiellement, même pour de courtes durées d'exposition, des risques sanitaires ne peuvent être exclus. L'auteur souligne que les recherches doivent être étendues à 1) d'autres composés (comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les dioxines & furanes, le mercure, etc.) 2) d'autres sites potentiels en France comme en Belgique.

---

[52] Bausinger, T., and Preuß, J. (2005). *Environmental remnants of the first World War: soil contamination of a burning ground for arsenical ammunition. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 74: 1045–1052.

[53] Bausinger, T., E. Bonnaire, E., and J. Preuß, J. (2008). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. Science of the Total Environment* 382: 259–271.

[54] *Ibid.*

3. Problématique posée et cadre de la recherche

3.1. PROBLEMATISATION

Les découvertes fortuites de pollutions des sols, locales, sévères, spectaculaires car visibles, mais également la mise en évidence sous la loupe des laboratoires d'analyses de polluants émergeants, invisibles, jamais identifiés auparavant car jamais encore recherchés, sont inattendues. Leurs survenues brutales sont par essence anxiogènes pour les populations exposées tout comme pour les administrations et autorités, garantes de la protection des populations, et prises au dépourvu. La gestion de ces situations intempestives nécessite d'abord de développer des réponses adaptées aux enjeux qui sont au croisement des préoccupations de la santé, de la protection de l'environnement et de la ressource en eau et de l'utilisation durable et l'aménagement du territoire. Si ces survenues et ces crises n'ont pu être anticipées c'est bien parce que (i) d'une part les faits et évènements historiques qui les ont générés, puis d'autre part (ii) les connaissances sur leurs propensions à polluer l'environnement sur le temps long, n'ont pas été visibilisés par le prisme de recherches historiques et environnementales.

La revue bibliographique et l'état de l'art sur les relations entre la Grande Guerre et l'environnement, montrent que les études et recherches sur le sujet restent rares, locales, parcellaires, et incomplètes. Leurs périmètres thématiques et géographiques se restreignent respectivement (i) aux conséquences géomorphologiques et pédologiques de l'usage des moyens de l'Artillerie, à la présence de métaux dans les sols et (ii) à des secteurs géographiques très limités sur l'ancien front occidental de 1914-1918. Les recherches se contentent d'établir un constat de modification de l'état des sols sur les anciens champs de bataille et d'en expliquer l'extension spatiale voire d'aborder son évolution temporelle, les auteurs se contentant de comparer, selon une démarche inadaptée les teneurs mesurées dans les sols à des seuils étrangers, sachant qu'en France il n'existe aucun seuil générique qualifiant le bon état des sols.

Aucune étude ou recherche n'a abordé dans la littérature scientifique la question du marquage des compartiments environnementaux par les composés persistants, autres que les métaux, entrant dans la formulation des explosifs, pourtant massivement produits et utilisés durant la Première Guerre mondiale. Les études et recherches sur les séquelles environnementales des conflits majeurs du XXe siècle, dont celles de la Grande Guerre, sur la ressource en eau et ses usages font défaut. L'impact environnemental rémanent de ces conflits constitue un champ de la recherche quasiment vierge de connaissances et inexploré. Pourtant, un faisceau d'éléments environnementaux (pollutions locales des sols et leur typologie, occurrence d'ions perchlorate dans les EDCH, etc.) et historiques exposés dans ce qui précède semble montrer que l'hypothèse de l'existence d'un marquage environnemental actuel spécifique aux évènements de la Grande Guerre mais aussi à des opérations de destruction de Restes Explosifs de Guerre hérités de la guerre dans l'entre-deux-guerres semble plausible.

Les découvertes fortuites de pollutions en lien avec 1914-1918 et leurs conséquences sociétales, économiques et financières, mettent en exergue des besoins de recherche sans équivoque qui dépassent le champ des travaux strictement académiques. Ces pollutions actuellement constatées trouvent toutes leurs origines et explications dans le temps passé, dans l'Histoire. Des accidents industriels, de transport, contribuèrent à introduire instantanément dans le monde souterrain, et localement, des masses parfois considérables de substances dangereuses alors que des émissions industrielles chroniques diffuses, dans les airs et les eaux, actives sur de longues périodes de temps, modifièrent la qualité des sols de vallées et de régions industrielles entières. Le temps qui passe transforme les pollutions, leur distribution spatiale mais aussi leur nature, et donc leurs propriétés de mobilité et de toxicité. Les pollutions actuelles d'origine ancienne sont des filles du temps.

Alors, le croisement et la mise en interlocution originale des disciplines de l'histoire et de l'environnement s'imposent pour espérer répondre à ces nombreuses questions, avec en premier lieu celle de l'origine des ions perchlorate dans les eaux de boisson dans le quart nord-est de la France, et évaluer en quoi et, le cas échéant, comment ils participent au *Fingerprint*[55] singulier et caractéristique des pollutions historiques héritées de la Première Guerre mondiale, qu'il s'agisse des faits de guerre bornés à 1914-1918, et/ou de la liquidation de la guerre par les opérations de destruction à grande échelle des REG qui débordèrent la conclusion du 11 novembre 1918.

3.2. CADRE TEMPOREL

Si la présente recherche a en effet pour objet la Première Guerre mondiale sur le théâtre des opérations ouest européen, bornée par les déclarations de guerre de l'Empire allemand à la Russie du 1er août 1914 puis à la France du 3 août 1914 et le cessez le feu imposé par le premier armistice du 11 novembre 1918, le cadre temporel de cette recherche a volontairement été laissé ouvert à l'entre-deux-guerres, la problématique du devenir des REG et la question de leurs impacts environnementaux n'ayant pas été réglée avec le cessez le feu. Certains aspects historiques antérieurs à 1914 ont aussi été explorés dans la mesure où ils permettent d'éclairer des faits et évènements historiques propres à la Grande Guerre et d'expliquer leur unicité.

3.3. CADRE GEOGRAPHIQUE

La présente recherche historique et environnementale vise (i) en premier lieu le front occidental s'étendant sur environ 750 km entre la frontière franco-suisse, au sud, et les plages de la mer du Nord, en Flandre occidentale (Belgique), au nord, et ses abords (zones des armées), mais aussi (ii) l'ensemble des territoires de la France, de la Belgique et de l'Allemagne (dans ses frontières postérieures à 1918) où furent produites, entreposées les munitions et les matières énergétiques. Un chapitre du présent manuscrit est spécifiquement consacré à un comparatif des modalités de gestion des REG entre la France, la Belgique et l'Allemagne (avec quelques éléments historiques relatifs à la Grande-Bretagne). Enfin, un autre chapitre est consacré au cas singulier de la gestion des REG sur les anciens territoires annexés du *Reichsland Elsass Lothringen* (territoire impérial d'Alsace Lorraine) correspondant aux actuels départements des Haut- et Bas-Rhin et de la Moselle.

[55] Terme anglo-saxon qui désigne l'« empreinte digitale », ce qui permet d'identifier l'identité unique d'une pollution, comme les teneurs ou les concentrations de substances et leurs proportions relatives dans les mélanges ou encore certaines compositions itopiques spécifiques.

4. Articulation du manuscrit et de la recherche

Les munitions étaient des matériels manufacturés formés de composés et éléments chimiques. Tirés par milliards sur les 52 mois de la Première Guerre mondiale sur le front occidental, des millions de tonnes de matériaux anthropiques d'origine pyrotechnique ainsi que des engins non explosés furent introduits dans les sols et peuvent potentiellement en dégrader la qualité (par rapport à celle du fond géochimique non perturbé), puis, par l'entremise de l'infiltration des eaux météoriques, impacter les eaux souterraines. Une origine militaire ancienne, en lien avec les munitions et explosifs perchlorates de la Grande Guerre, fut ainsi invoquée pour expliquer l'origine des ions perchlorate dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine dans le quart nord-est de la France.

La première étape de ma recherche est d'étudier précisément quels furent les matériels perchlorates et plus largement quels étaient les éléments et substances qui constituaient les engins de guerre, les matières explosibles et agressives caractéristiques de la Première Guerre mondiale ainsi que leurs sous-produits de transformation environnementale.

Puis dans un second temps, il s'agit d'apprécier où et comment ces matériels, munitions et projectiles furent utilisés durant la Grande Guerre et quelles étaient les raisons technologiques et historiques expliquant l'ampleur inédite de l'usage des moyens de l'Artillerie d'une puissance inégalée auparavant, et quels régimes de fonctionnement ou de dysfonctionnement furent suivis par ces engins une fois tirés lors des combats et duels de l'Artillerie.

Puis, les sites pollués par des résidus de munitions de 1914-1918 de la « Place à gaz », Clere & Schwander, en Meuse et Kelsterbach en Allemagne rappellent que d'autres pratiques et activités en lien avec 1914-1918 que les tirs de munitions ont pu être à l'origine de dégradations durables de l'environnement. Cette recherche aborde puis développe donc cette question longtemps restée en marge du champ des recherches et de l'historiographie officielle de la Grande Guerre, celle de la remise en état des sols, du retrait et de la gestion des épaves de guerre abandonnées et de la destruction selon diverses méthodes de tonnages élevés de matériels de guerre polluants.

Se posent ensuite les questions comment, selon quels mécanismes, les substances chimiques formant les chargements des munitions de 1914-1918 initialement confinées dans des enveloppes métalliques (*casings*) ont pu avoir été mises au contact de l'environnement, en distinguant deux cas de figures : d'une part le devenir des chargements des munitions tirées au droit du champ de bataille et des sols les plus intensément pilonnés et d'autre part ceux des munitions abandonnées et volontairement démolies à l'instar de ce qui a conduit aux pollutions des sols en Meuse et à Kelsterbach.

Quels sont les *Fingerprints* des matières explosibles typiques de 1914-1918, des pollutions des sols et des eaux souterraines induites par les combats et/ou les opérations de destruction de munitions ? Les ions perchlorate identifiés dans les EDCH sont-ils des contributeurs à l'empreinte de la Grande Guerre sur notre environnement actuel ?

L'objectif final est de mettre en perspective ces *Fingerprints* dans le but d'établir de possibles liens de causalité entre le marquage des eaux souterraines et des faits et pratiques historiques susceptibles d'avoir introduit ces composés dans les eaux, et possiblement d'apprécier s'il s'agit d'un marquage de guerre et/ou d'après-guerre.

Le présent manuscrit et la recherche s'articulent en deux volets.

Le premier est principalement consacré, après avoir décrits les principales phases et évènements ayant jalonné la Première Guerre mondiale sur le front occidental (Section 3), à la connaissance historique concernant l'usage des munitions, matières et matériels explosibles et agressifs produits et utilisés durant la Première Guerre mondiale puis genèse (Section 4h et Section 6h). la récupération et la liquidation des Restes Explosifs de Guerre et des surplus durant le conflit (1914-1918, Section 5h), dans l'immédiate sortie de guerre (1918-1919, Section 7h) puis dans l'entre-deux-guerres (1920-1941, Section 8h).

La Section 9h et la Section 10h sont spécifiquement dédiées à respectivement (i) la gestion et la liquidation des surplus et Restes Explosifs de Guerre ex-allemands dans les anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL)) et (ii) la liquidation des surplus de munitions en excès, obsolètes, hors services en France et en Allemagne.

La Section 11h est technique et consacrée aux méthodes et moyens utilisés principalement dans l'entre-deux-guerres pour le déchargement des munitions et la destruction des Restes Explosifs de Guerre.

Enfin, la Section 12h propose une évaluation des tonnages de Restes Explosifs de Guerre détruits et un inventaire des sites de destruction à l'échelle des régions Hauts-de-France et Grand'Est, principalement concernées par les évènements et combats de la Grande Guerre sur le front occidental.

La Section 1h est de prime importance dans cette recherche historique à objectifs environnementaux puisqu'elle aborde, selon une approche originale, couplant des recherches historiques, des analyses chimiques et isotopiques sur plus de 70 échantillons de poudres propulsives et explosifs de 1914-1918 collectés sur le terrain à la faveur de cette recherche, la composition des matières énergétiques susceptibles d'avoir été introduites dans les sols à la faveur de l'usage, de l'abandon ou de la destruction des munitions et autres projectiles. Cette Section fait appel à des techniques et outils analytiques et isotopiques, performants et originaux, habituellement appliquées en géosciences à d'autres matrices solides comme les sols. Ces composés chimiques constitutifs des engins de guerre évoluent une fois exposés aux conditions environnementales naturelles.

Ces comportements environnementaux font l'objet de la Section 2h. Les résultats de la recherche exposée dans la Section 1h et la Section 2h permettent de contraindre et d'orienter les choix des substances et composés à rechercher dans les échantillons de sols et/ou d'eau souterraine nécessaires pour identifier et caractériser l'empreinte environnemental de la Grande Guerre dans ces milieux.

Si les Section 1h et 2h permettent de répondre à la question « que rechercher dans l'environnement? », les Sections 3h à 12h apportent des éléments de réponse historiques (i) sur les modalités d'introduction des composés d'origine pyrotechnique dans l'environnement durant le conflit et post-conflit (ii) sur la géographie des Restes Explosifs de Guerre et des sites ayant opéré leur démolition (et répondre à la question « Où rechercher ? »).

Le volet historique ouvre sur le second volet, essentiellement environnemental.

La Section 1e rappelle les principaux régimes de fonctionnement et de dysfonctionnement des projectiles tirés durant la Grande Guerre puis discute si les engins tirés, et donc les bombardements opérés lors des duels d'Artillerie ont été, sont ou seront des sources de composés d'origine pyrotechniques susceptibles de dégrader durablement la qualité des sols et/ou des eaux souterraines. Cette section s'attache donc à apporter des éléments de réponse à la question si les faits de guerre et les combats de 1914-1918 peuvent avoir dégradé l'environnement.

La Section 2e est dédiée à la description des modalités de destruction de Restes Explosifs de Guerre par éclatement (*Open Detonation* (OD)), à la genèse et la physionomie des terrains de destruction ainsi qu'aux mécanismes en jeu dans la libération dans les sols de résidus d'explosifs. Cette recherche s'appuie aussi sur un retour d'expérience étranger concernant la connaissance des pollutions induites par OD et des données originales mises à dispositions ou acquises à la faveur de sites de destruction par OD en Meuse, dans le Nord et en Allemagne.

Le caractère polluant des opérations de déchargement et de destruction de munitions et autres matières de guerre par brûlage (*Open Burning* (OB)), ainsi que (i) la typologie et la physionomie des terrains de brûlage (ii) le *Fingerprint* des cortèges de polluants présents dans les résidus de brûlage, (iii) l'exploitation des *Fingerprints* comme indicateurs de la typologie des matériels brûlés et des modalités de brûlage, font l'objet de développement spécifiques exposés dans la Section 3e.

Cette recherche s'appuie sur un important jeu de données analytiques acquis à la faveur de recherches et diagnostics sur 13 terrains de brûlage en France, en Belgique ainsi qu'en Allemagne.

Enfin, la Section 4e est spécifiquement dédiée au marquage des eaux souterraines par les ions perchlorate et autres substances d'origine pyrotechnique dans le but, pour les ions perchlorate, de discriminer les différentes sources (militaires, agricoles anciennes) et origines (synthétiques ou naturelles). Cette recherche s'appuie sur (i) les données capitalisées par l'ANSES à la faveur de la campagne nationale exploratoire de recherche des résidus d'explosifs (2020-2021), pour les régions Hauts-de-France et Grand'Est, complétées par celles issue de la campagne du Plan Régional Santé Environnement n°3 (PRSE 3) en région Grand'Est, (ii) des études sectorielles originales permettant de situer précisément les mesures environnementales dans leurs contextes historiques et hydrogéologiques. Ces études réalisées dans le massif des Vosges (champs de bataille de La Chapelotte (Meurthe-et-Moselle), du Lingekopf (Haut-Rhin)), en Argonne (Marne et Meuse) et à la butte de Vauquois (Meuse), sur le front de Champagne (secteur centré sur le grand camp militaire actif de Suippes (Marne)), à Cramont (Somme) et Neufchâtel-sur-Aisne (Aisne) combinent différentes approches originales (i) historiques, (ii) analytiques, (iii) isotopiques et (iiii) archéologique et spéléologique (souterrains de la guerre de mines en Argonne et à Vauquois). Cette section centrale vise, en s'appuyant sur les résultats de la recherche exposés dans les sections historiques et environnementales précédentes, à explorer les éventuels liens de causalité entre les évènements et faits de la guerre et/ou de la sortie de guerre et le marquage des eaux souterraines par les ions perchlorate et d'éventuels autres composés d'origine pyrotechnique constituant les matières énergétiques caractéristiques de 1914-1918.

Sources, corpus documentaire et archivistique

1. Documents et archives

Un imposant corpus archivistique a été constitué à la faveur des travaux de recherche exposés dans le présent manuscrit. De très nombreux fonds d'archives (i) internationaux (*National Archives, Kew gardens* à Londres (Grande-Bretagne), *National Archives* à Washington D.C. (Etats-Unis), Centre de documentation historique des forces armées à Evere (Belgique)), (ii) nationaux (archives nationales (AN) à Pierrefitte, Service Historique de la Défense (SHD, Direction de l'Armée de Terre) à Vincennes, Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF) à Savigny-le-Temple) et (iii) fonds d'archives départementaux ont été consultés dans le cadre de cette recherche. Les départements consultés sont ceux où historiquement (i) se sont déroulés les combats de la Grande Guerre (AD 02, 08, 51, 54, 55, 57, 59, 62, 67, 68 et 90). (ii) ont été produites, stockées des munitions des deux conflits mondiaux (archives départementales 03, 41, 45, 79 et 89), et (iii) ceux possédant une importante présence militaire, comme des camps d'exercice, des champs de tir, des casernements, etc.). Les archives du Service Historique de la Défense ont été régulièrement consultées entre 2012 et 2017, celles des Archives Nationales en 2015 et 2016. Il faut souligner ici, qu'il existe très peu de documents relatant les conditions et les modalités de la retraite allemande de l'automne 1918 qui reste un point aveugle de l'historiographie de la Grande Guerre. Si des écrits avaient été produits et conservés aux archives, ils auraient été détruits, l'Allemagne perdit en effet une très grande partie de ses archives de la Grande Guerre lors du bombardement allié sur Leipzig en décembre 1943 où étaient conservées les archives militaires.

Concernant la Première Guerre mondiale et l'entre-deux-guerres, les archives, lorsqu'elles existent, versées au Service Historique de la Défense, sont celles des fonds de l'Artillerie (sous-série GR 9 NN 3 « *Fond de Moscou* [56]»), du Grand Quartier Général (GQG)[57] (cotes d'indice GR 16 NN), et du Génie (sous-série 2V). Les cotes suivantes se sont aussi montrées riches en informations en ce qui concerne le désobusage (destruction des Restes Explosifs de Guerre) de l'entre-deux-guerres :

- GR 8 N 92 : Enquêtes sur les marchés de l'Etat passés dans les régions : les marchés de récupération et de désobusage dans la première région ;
- GR 8 N 120 : Service de désobusage de la place de Douai et dans les régions (1929-1930).

Au niveau des archives départementales, on constate une forte hétérogénéité dans les quantités d'archives conservées et la qualité de l'information qu'elles recèlent en ce qui concerne la destruction de munitions et des REG. Certaines archives de secteurs particulièrement concernés par les évènements de la Grande Guerre et le désobusage, comme l'Aisne et la Somme sont paradoxalement pauvres en informations. Pour l'Aisne, une grande partie des archives aurait été détruite lors des destructions par bombardements aériens de la Seconde Guerre mondiale.

[56] Le « fond de Moscou » est un très important ensemble d'archives françaises : archives policières et militaires prises après la défaite de 1940, archives des services spéciaux prises après l'invasion de la zone libre. L'ensemble, transporté en Allemagne, saisi par les troupes soviétiques en 1945 en Allemagne est rendu à la France en 1994 et 2000.

[57] Le Grand Quartier Général (GQG) était l'outil de commandement du général commandant en chef les armées, sitôt la mobilisation annoncée. Son autorité s'étendait sur la zone des armées, selon les termes du décret du 2 décembre 1913 sur le service des armées en campagne, la zone de l'intérieur restant sous l'autorité du Ministre de la Guerre.

A noter par ailleurs le cas particulier des archives départementales du Bas-Rhin (Strasbourg) qui conservent (cote 121 AL 402 et 121 AL 408) de nombreux documents ayant trait au désobusage conduit dans l'entre-deux-guerres sur le territoire de l'ancien territoire annexé du *Reichsland Elsass Lothringen*.

Au niveau départemental, les archives ont été versées dans des fonds « *Organismes temporaires du temps de guerre* » ou « *Eaux & Forêts* ». Enfin, il est à noter que certains documents conservés au Service Historique de la Défense (site de Vincennes, cote GR 16 N 2586, etc.) ou à Strasbourg concernent des opérations de démolitions réalisées par l'armée française et/ou des entrepreneurs français sur le territoire de l'Allemagne (Kelsterbach) et de l'Italie (Corsico, Milan).

A Muzeray (département de la Meuse), des extraits des archives municipales relatives aux opérations de désobusage menées sur le ban de la commune par l'entreprise Clere & Schwander ont aussi pu être rassemblés.

Ces archives correspondent pour leur très grande majorité à des correspondances administratives entre les différents acteurs impliqués dans la remise en état des sols, le désobusage et la liquidation des REG, régaliens civils (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, Eaux & Forêts, etc.), comme militaires (GQG, Commandement de l'Artillerie des différentes Régions militaires), ou encore privés (entrepreneurs du désobusage et de la récupération). Les archives conservent par ailleurs, les mémoires techniques sur lesquels le GQG s'appuya pour établir ses instructions (notes) en matière de rassemblement, de récupération et de désobusage. Ces archives ne donnent vraisemblablement qu'une vision partielle des opérations de récupération et de liquidation des REG réellement effectuées; les pratiques courantes des désobuseurs militaires ou civils sur le terrain ne sont pas documentées.

Les autres sources d'informations qui ont été exploitées dans le cadre de cette recherche sont les suivantes:

- Des ouvrages anciens, périodiques et journaux historiques numérisés à la Bibliothèque nationale de France (BnF, Paris) relatant les activités industrielles visant la production de poudres et explosifs, munitions, les activités de désobusage et de remise en état des sols aux termes de la Grande Guerre et faisant l'écho des très nombreux accidents, souvent mortels les ayant émaillés. Ces documents sont accessibles en ligne sous le site de la BnF. http://gallica.bnf.fr/ ;
- Des archives picturales et photographiques mises à disposition par des particuliers (archives privées, collections particulières) comme celles portant sur les activités de désobusage au sein de l'usine Clere & Schwander (département de la Meuse), ou celles concernant l'usine F.N. Pickett & Fils de Trélon, Liessies (département du Nord) ;
- Les banques photographiques de l'*Imperial War Museum* (IWM, Londres, http://www.iwm.org.uk/collections/photographs), renfermant notamment un jeu exceptionnel de 15 clichés pris en 1922 au sein des ateliers de la plus grande des usines F.N. Pickett & Fils en France (usine *D-Factory* de Dannes Camiers dans le département du Pas-de-Calais) ;
- La banque photographique des *National Archives* à Washington D.C. conservant sous la cote RG-306-NT, Box 367, le *Rush* (épreuves) photographique d'un Article du journal *The New York Times* paru le dimanche 3 mai 1936 sous le titre « *Echoes of the World War in the "Red zone" of France* ». Le journaliste est venu enquêter en France vers 1936 au sujet des activités de désobusage dans la Somme (région d'Albert) et dans l'Aisne (région de Coucy-le-Château Auffrique). Les clichés montrent les opérations de destruction de munitions, mais aussi leur environnement et les conditions dans lesquelles elles furent effectuées dans les années 30, avec de la part du photograhe un réel souci de l'esthétique.

L'élimination des munitions chimiques anciennes en Belgique dans l'entre-deux-guerres est particulièrement bien documentée dans Zanders, J. P [58] (1997). Cette publication s'appuie sur les fonds d'archives du Centre de Documentation Historique des forces armées, Evere, Belgique et ceux des *National Archives, Kew gardens* à Londres.

Enfin, concernant la liquidation des REG en Allemagne post-conflit, la présente recherche s'est notamment appuyée sur les travaux et publications (en langue allemande) de Bausinger (2011)[59], Preuss, Eiteberg, (1999)[60], Preuss et al., (2000)[61] et Schwendner (2008)[62].

Les sources et archives sont listées dans la section bibliographique du présent manuscrit.

2. Exploitation de photographies aériennes anciennes

La seconde source d'information exploitée pour identifier et localiser des sites d'élimination d'engins de guerre est celle des photographies aériennes anciennes. En effet, les destructions opérées par « pétardement » (*Open Detonation*) ont profondément bouleversé les sols meubles en creusant par détonations répétées de profonds entonnoirs, visibles sur des photographies aériennes. Certaines installations spécialement conçues pour la démolition de munitions, l'élimination de poudres et explosifs rebutés, peuvent également marquer durablement la topographie et être visibles par reconnaissance aérienne : tranchées et rangées de brûlage, unités industrielles, fosses d'enfouissement, etc. Les clichés exploités dans le cadre de cette recherche sont ceux, publics, de l'Institut Géographique National (IGN), téléchargeables sur son site internet de l'IGN « *Remonter le temps* » (https://remonterletemps.ign.fr/). Ces clichés ont été complétés par ceux réalisés à la fin de l'année 1918 par le corps expéditionnaire américain (*American Expeditionary Force* (AEF)) stationné en Meuse et en Champagne (*National Archives*, Washington D.C. cote RG 120). Le territoire national a été systématiquement couvert par les photographies aériennes à partir de 1946. Avant cette date, les missions de survol photographique sont parcellaires, ciblées à certaines zones, montrant une grande hétérogénéité dans la qualité (résolution, contraste, clarté, etc.), la densité, la continuité des clichés. Les premiers clichés, pris à basse altitude, datent de 1919. D'autres missions ponctuelles ont été réalisées en 1922, 1935, 1937, 1939 et 1940. Compte tenu de ces éléments, la recherche des sites de destruction d'engins de guerre exploités dans l'entre-deux-guerres s'est avérée particulièrement délicate. A noter que le complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt a fait l'objet en 1922 d'une couverture photographique aérienne exceptionnelle par deux missions distinctes.

---

[58] Zanders, J. P. (1997). « The destruction of old chemical munitions in Belgium » in *The Challenge of Old Chemical Munitions and Toxic Armament Wastes*. Thomas Stock (ed.). Karlheinz Lohs (ed.) pp 197–230. https://doi.org/10.1093/oso/9780198291909.003.0015.

[59] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*. Universität J. Gutenberg, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut, Mainz. Communication personnelle. Non publié.

[60] Preuss, J., Eitelberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espagit AG*. Mainzer geographische Studien 45.

[61] Preuss, J., Eitelberg, F., Dehner, U., Albrecht, G., Laskowski, S. (2000). *Modellhafte Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und – vernichtung nacg dem 1. Weltkrieg. Standorte Zweedorf und Nüssau. Band 1. Historische Erkundung.* Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dezember 2000.

[62] Schwendner, A. (2008). *Lost – König der Kampfstoffe*. Bund deutscher Feuerwerker und Wehrtechniker. Mitteilung 2 / 2008.

La recherche sur photographies aériennes anciennes a été orientée :

- Par des indications de lieux identifiés dans les archives ;
- Par la localisation des principaux dépôts de munitions, à proximité desquels ont été opérées les destructions ;
- Par des informations historiques sur les zones de combats ayant mis en œuvre d'importants moyens de l'Artillerie ; les zones pilonnées durant la Première Guerre mondiale étaient en général distantes de 5 à 15 km de la position des batteries. Ces deux zones de 5 à 10 km de large, situées de part et d'autre des lignes de front ont été considérées pour la recherche méthodique des clichés à consulter.

Plus de 10 000 photographies aériennes anciennes ont été analysées entre 2016 et 2022. L'identification sur photographies aérienne procède en observant pour un même lieu géographique une séquence de clichés pris à des dates différentes. En effet, les survols d'une même zone ont été effectués à des dates différentes correspondant à des saisons différentes, avec des usages des sols qui peuvent évoluer dans le temps. Ainsi, il s'est avéré que les clichés les plus intéressants en terme de qualité d'informations sont ceux pris en hiver (éclairage rasant accentuant les contrastes des reliefs, absence de couverture arborée ou végétative). Les sites de pétardement observés sur des clichés de 1940 à 1949 ont été attribués à l'entre-deux-guerres compte tenu de l'état de leur surface (végétalisée).

Les limites de la recherche sur photographies aériennes sont les suivantes :

- Disparité des couvertures et densités des missions photographiques selon les régions ; certains territoires, comme ceux de certaines bases aériennes et/ou terrains militaires, n'ont pas fait l'objet de prises de vues ariennes rendues publiques ;
- Les destructions par éclatement impriment peu les terrains formés de roches dures et sont difficilement identifiables par la photographie aérienne.

3. Observations, reconnaissances de terrain, caractérisation de l'état des milieux

3.1. RECONNAISSANCES DE TERRAIN

Certains sites pour lesquels il existe une sensibilité environnementale particulière ou, lorsqu'identifiés sur clichés aériens anciens, il persiste un doute quant à leur nature, ont fait l'objet d'une reconnaissance visuelle sur le terrain ; il s'agit des sites de Barenton-Bugny, Barenton-Celles, Saint-Erme-et-Outre dans l'Aisne, Trélon et Liessies dans le département du Nord, Conteville Domléger dans le département de la Somme, Fampoux dans le département du Pas-de-Calais, les ravins du Helly et du Chaufour, Brandeville, Remoinville dans le département de la Meuse, le site d'enfouissement de munitions dit « *Des Burettes* » à Pénol et le site de vidage d'obus à *Ypérite* En Rhône Alpes. Le témoignage d'un habitant de Domléger a aussi été recueilli en 2016, possédant le souvenir des récits de son propre père concernant les accidents et les activités au sein de l'usine F.N. Pickett & Fils de Conteville Domleger.

Les recherches historiques, spéléologiques et archéologiques menées en Argonne dans le cadre de ce doctorat et par Guillaume Jacquinet (association des « Amis de Vauquois »), missionné par la DRAC Lorraine (Direction Régionale des Affaires Culturelles) pour l'étude et la préservation des lieux et vestiges souterrains, fournissent un exemple et un aperçu saisissant des quantités et typologies de matériels explosifs abandonnés et en partie encore présents de nos jours sous terre dans les anciens souterrains de combat. Des reconnaissances de ces souterrains ont été réalisées sous la conduite de Guillaume Jacquinet les19 juin 2019, 24 juillet 2019, 4 février 2020 et le 15 octobre 2021. Elles furent aussi l'occasion d'échantillonner des fragments de poudres, d'explosifs et les eaux souterraines ennoyant les systèmes de galeries profonds, pour analyses différées au laboratoire (cf. Section 1h et Section 4e du présent manuscrit).

3.2. ETUDES, RECHERCHES ENVIRONNEMENTALES ET HISTORIQUES

Des études à vocation environnementale, comprenant selon les cas des recherches historiques sectorielles, des investigations de terrain parfois approfondies (sites de la « Place à gaz » et du complexe de désobusage Clere & Schwander), nécessitant d'importants efforts scientifiques, financiers et communicationnels, dans des contextes environnementaux et aussi socio-politiques complexes, ont aussi été réalisées depuis 2011 dans le cadre de missions d'appui aux politiques publiques du BRGM et de projet de recherche et développement. Un inventaire des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres a par ailleurs été diligenté sous mandat du Ministère en charge de l'Environnement en 2016. Ces études, recherches historiques et environnementales et l'inventaire alimentent en partie la recherche exposée dans le présent manuscrit. Ces études ont fait l'objet de rapports qui sont énumérés ci-dessous :

- Recherche de l'origine des ions perchlorates marquant les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) dans le massif des Vosges. Etudes historiques et environnementales sur les secteurs de La Chapelotte (commune de Badonviller, département de la Meurthe-et-Moselle), du Lingekopf (commune de Hohrod et Hohroberg, département du Haut-Rhin) et de l'Harthmannswillerkopf (département du Haut-Rhin) : Hubé D. (2019). *Recherche de l'origine de l'empreinte perchloratée des eaux du Massif des Vosges. Etudes sectorielles (54,68). Rapport final.* BRGM/RP-68790-FR, 196 p., 56 fig., 18 tabl., 3 ann., CD ;

- Inventaire national des sites de destruction de munitions de la Première Guerre mondiale de l'entre-deux-guerres. Etude historique et cartographie des sites : Hubé D. (2018). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expériences sur leurs conséquences environnementales. Rapport final*. BRGM/RP-68476-FR, 232 p., 96 fig., 13 tabl., 4 ann., 1 CD ;

- Diagnostic des milieux et Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) du site dit de « la Place à gaz » en Forêt de Spincourt, commune de Gremilly, département de la Meuse : Hubé D., Bâlon P. avec la collaboration de Bodénan F. (2015). *Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55) - Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final*. BRGM/RP-65376-FR, 203 p., 69 fig., 42 tabl., 5 ann. ;

- Diagnostic des milieux et Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) du complexe de désobusage industriel « Clere & Schwander » du canton de Spincourt, communes de Muzeray, Vaudoncourt et Loison, département de la Meuse : Hubé D., Bâlon P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final*. BRGM/RP-68907-FR, 254 p., 80 fig., 43 tabl., 1 cdrom contenant les annexes.

VOLET HISTORIQUE

Faits et pratiques polluantes dans un conflit et une sortie de guerre inédits

Personnel de l'entreprise de désobusage Savot Frères & Cie éventrant à coup de masse et poinçon un projectile chimique britannique Livens vidé[63]*.*

[63] National Archive, Washinghton D.C. number RG-306-NT, Box 367. Extrait d'un « *Rush* » photographique d'un Article du journal *The New York Times* paru le dimanche 3 mai 1936 sous le titre « *Echoes of the World War in the "Red zone" of France* ».

Section 1h
Chargement et compositions des engins de guerre.

1. Introduction de la Section 1h

L'usage de poudres, explosifs et munitions lors des combats de la Première Guerre mondiale sur le front occidental a été invoqué dès 2011 afin d'expliquer l'occurrence à l'échelle régionale dans les Hauts-de-France, des ions perchlorate dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) sans qu'aucune étude ou recherche publiée, qu'elle soit environnementale et/ou encore historique, ne soit venue étayer ce postulat.

Je me propose donc dans un premier temps, après avoir défini les termes et concepts techniques essentiels à la compréhension du propos exposé dans ce manuscrit, d'explorer quelles ont été les compositions des matières énergétiques, poudres et explosifs, et autres chargements d'engins de guerre utilisés durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental.

Pour cela, une approche originale transdisciplinaire a été retenue, couplant (i) une recherche historique classique sur la base de corpus d'archives et ouvrages anciens de référence (ii) une recherche analytique par la caractérisation au laboratoire d'un jeu exceptionnel d'échantillons de poudres et explosifs collectés sur le champ de bataille et des sites de destruction de munitions post 1914-1918, en précisant par ailleurs les possibilités et limites de la démarche. Cette caractérisation porte à la fois sur la composition et la signature (*Fingerprinting)* (i) chimique de ces matières (les composés et substances en présence et leurs proportions respectives) et (ii) isotopique (pour l'oxygène (O) et le chlore (Cl) des molécules de perchlorate (ClO_4^-), l'oxygène (O) et l'azote (N) des nitrates (NO_3^-)). Il s'agit par cette démarche d'identifier les points de convergence et de divergence entre les indications documentaires délivrées par les archives et celles révélées par les moyens analytiques modernes, puis de les expliquer et de les discuter. Pour cela, la recherche historique a été volontairement et judicieusement élargie à la connaissance, même succincte, des matières premières et procédés industriels nécessaires à la fabrication des poudres et explosifs de la Grande Guerre.

Une quantification des tonnages des matières constitutives des chargements des engins de guerre est aussi proposée, basée sur les recherches de Bausinger (2011) afin de (i) prendre la dimension de l'ampleur de la production et en corollaire de celle de leurs usages, (ii) hiérarchiser quantitativement les usages pour chacune des substances dont dépendent les probabilités d'occurrence dans l'environnement.

L'objectif est de disposer *in fine* d'un panorama le plus exhaustif possible de l'ensemble des composés et substances présents dans les munitions et matières énergétiques, susceptibles d'avoir été introduits dans l'environnement. Une attention et un développement tout particuliers ont été accordés aux formulations explicitement (per)chloratées, provenant de toutes les parties belligérantes, mais aussi aux formulations susceptibles de l'être implicitement du fait de la nature des matières premières et des procédés industriels nécessaires à leur production. Enfin, ont aussi été fléchées celles où leur occurrence peut être écartée d'office.

Mais la caractérisation des impacts actuels éventuels en lien avec l'usage ne saurait se limiter à la recherche par des analyses au laboratoire des sols, des eaux des seuls composés et substances identifiées dans les formulations des chargemements et éléments constitutifs des munitions.

En effet, bon nombre de substances énergétiques sont réactives et se transforment une fois placées au contact des conditions environnementales. La liste des composés à considérer dans cette recherche environnementale et historique doit être étendue aux sous-produits issus des processus, divers, parfois complexes, de transformation environnementale des composées constitutifs des projectiles et autres matières explosibles utilisés durant la Grande Guerre. Une synthèse des principaux processus, biotiques comme abiotiques, contrôlant le devenir spatial et temporel de ces composés est proposée dans la Section 2h du manuscrit.

Une matrice, établissant le lien entre les différents chargements des engins de guerre identifiés et leurs éléments constitutifs, est proposée en guise de résumé et de conclusion. C'est sur cette liste d'éléments et de susbtances constitutives, étendue à leurs sous-produits de transformation environnementale les plus couramment mesurés dans les milieux naturels, que se basent les recherches des résidus d'explosifs dans les eaux souterraines et dans les sols, menées dans le cadre de caractérisation environnementales aux échelles locales (sites), sectorielles ou régionales.

Ensuite, dans un second temps, je m'attache à décrire où, comment et à quelles échelles et hauteur ces matériels et matières énergétiques et agressives furent utilisés lors de la Première Guerre mondiale sur le front occidental. Pour cela les grandes phases de la Grande Guerre et leurs charnières sont décrites afin de contextualiser sur le plan historique ce qui constitue le cœur de la recherche de cette sous-section, à savoir l'usage de l'Artillerie, des poudres, explosifs et autres matières agressives. Les principales évolutions, quantitatives en matière de nombres de coups tirés, de pièces d'artillerie formant les parcs, et qualitatives, avec la typologie des matériels et de leurs usages (tactiques et modes d'action opératifs) sont développées afin de mettre en exergue le caractère inédit de l'usage de ces armes, d'une puissance et d'un pouvoir de destruction et d'attrition inouïs, dans le phénomène guerrier.

2. Prolégomène. Munitions et artillerie durant la Première Guerre mondiale

Avant d'entamer le propos qui importe dans cette présente recherche, et de faciliter la lecture et la compréhension de cette section, il apparaît opportun et pertinent d'identifier, de définir, voire de clarifier, même succinctement les principales notions techniques nécessaires à la compréhension des constitutions, compositions, usages et fonctionnement des moyens de l'Artillerie, à savoir d'une part les canons, dans leur grande diversité, et d'autre part, l'arme des artilleurs, c'est-à-dire les projectiles parmi lesquels, les obus.

2.1. OBUS ET PROJECTILES

Les projectiles employés durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental pour la conduite des combats peuvent être regroupés en deux catégories distinctes (i) les éléments constitutifs du corps des engins appartenant à la grande famille des métaux et métalloïdes, basés sur le fer (acier, fonte, etc.) et des métaux et alliages non ferreux (cuivre, laiton, zinc, plomb, etc.) et (ii) leur chargement fait principalement de composés chimiques organiques ou encore inorganiques, énergétiques ou agressifs, d'une très grande diversité.

2.1.1 Définition et constitution

L'obus est par définition l'arme de l'artilleur, le canon n'étant que le moyen de le vectoriser sur sa cible. Une munition est un projectile ayant une fonctionnalité militaire. Le projectile oblong au profil ogival effilé est dénommé « obus » lorsque son calibre excède 20 mm. Les projectiles se catégorisent selon leur fonctionnalité militaire, leur chargement (explosif, chimique, fumigène, éclairant, d'exercice, incendiaire, etc.), leur cible (projectiles anti-aériens, antichars, percutants, de marine, etc.) et leur calibre. Les calibres les plus fréquents durant la Grande Guerre étaient ceux de 20 mm, 37 mm, 75 mm, 77 mm, 90 mm, 105 mm, 150 mm, 155 mm, 210 mm, 320 mm et 380 mm. Dans l'artillerie britannique, qui n'utilisait pas le système métrique pour définir les calibres, ces derniers étaient qualifiés par la masse du projectile (*pound*[64], livre) et/ou par leur diamètre (*inch*[65], pouce). Les obus de calibre supérieur à 100 mm étaient classés en projectiles d'artillerie lourde, et ceux de calibre inférieur d'artillerie de campagne. Les plus gros obus (bien qu'ils n'aient pas été utilisés) avaient un calibre de 520 mm et pouvaient peser jusqu'à une tonne.

Ces obus correspondent à des « réservoirs » aux parois métalliques (*casing*), faites de fonte, fonte aciérée ou d'acier, pouvant être monobloc (usinés d'un seul tenant) ou composite (bi-, tri-blocs, etc. puis assemblés). Certains obus d'artillerie de campagne, comme ceux, allemands, de 77 mm et de 105 mm, pouvaient être « allongés » par une rallonge vissée à l'ogive.

Les épaisseurs des *casings* des obus d'artillerie étaient généralement supérieures à 1 cm et pouvaient atteindre jusqu'à 6 cm (obus dits « de rupture »). L'épaisseur des parois des obus était en relation avec la fonctionnalité militaire des engins et répondait aussi à la nécessité de sécurisation du tir (résistance mécanique de l'enveloppe au coup de départ). Les obus dits de « rupture » étaient dotés de parois très épaisses pour pouvoir transpercer les bétons des fortifications vissées (cf. Figure 3 ci-contre).

Figure 3 : Culots de deux obus allemands de 105 mm ; celui de gauche est encore chargé de dinitrobenzène, celui de droite de TNT. Noter la différence d'épaisseur des enveloppes (1,5 cm à gauche contre 2,5 cm à droite). Le culot de droite correspond vraisemblablement à un obus de rupture. Site de désobusage Clere & Schwander, Vaudoncourt Loison, département de la Meuse[66].

Les obus étaient dotés d'une ou plusieurs ceintures de métal mou (placées au culot et/ou sous l'ogive) qui permettaient, au départ du coup, d'imprimer un effet gyroscopique au projectile par le passage du projectile dans les rayures hélicoïdales internes de l'âme du canon. Cet effet stabilisait l'engin sur sa trajectoire ce qui permettait un tir précis.

[64] Une livre équivaut à 0,45 kg.

[65] Un pouce équivaut à 2,54 cm.

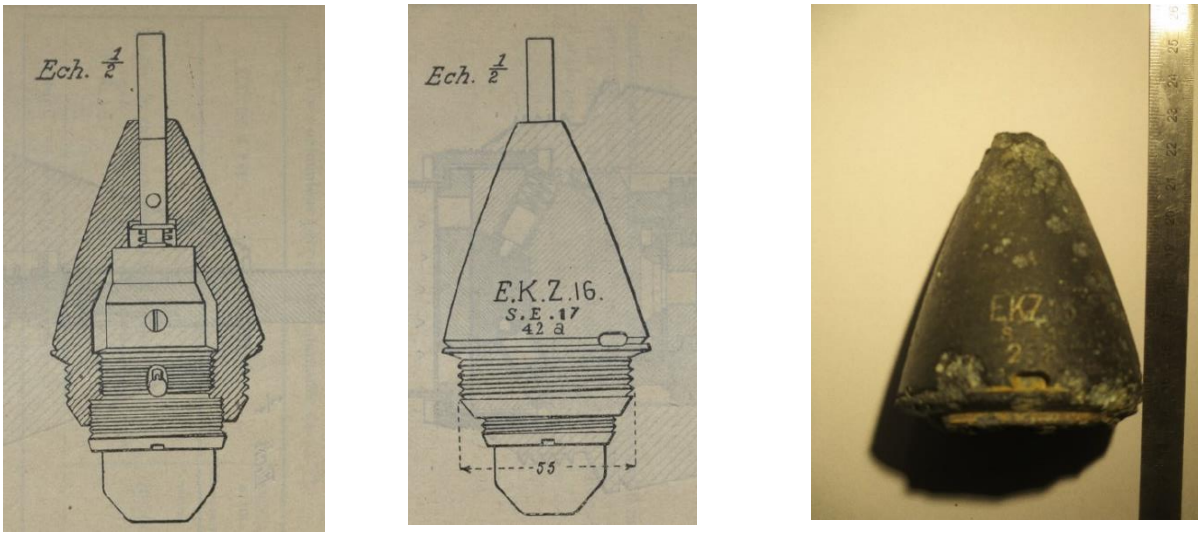
[66] Hubé, D. (2017).

2.1.2 Fusées d'artillerie et gaines-relais détonateurs

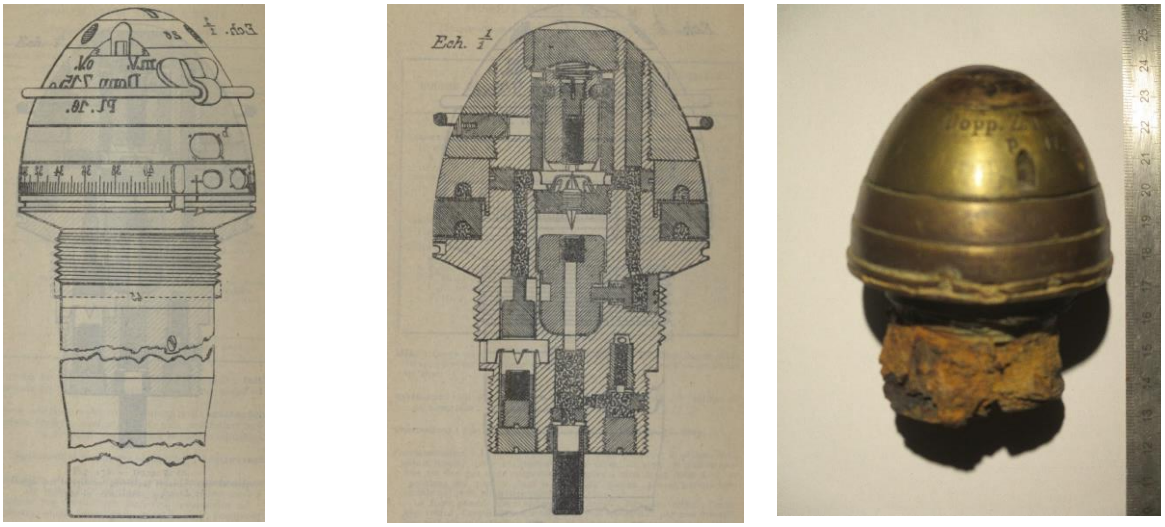
Une fusée d'artillerie est un dispositif pyrotechnique et mécanique destiné à initier la détonation des charges explosives des projectiles. Elle est placée à l'ogive ou au culot (pour les projectiles de gros calibre). Les amorces constituées par un explosif dit « primaire », contenues dans les fusées initient la chaîne pyrotechnique déclenchée au moment du tir et s'achevant par la détonation, le fonctionnement escompté du projectile. La détonation de l'amorce se transmet d'abord à une charge explosive brisante intermédiaire, positionnée entre l'amorce et la charge explosive principale. Cette charge intermédiaire du « détonateur », ou charge relai, est renfermée dans une gaine-relai cylindrique ou une capsule placée (vissée) sous les amorces des fusées d'artillerie (cf. Figure 4 et Figure 5). Ces relais ont pour fonction de capter l'onde de choc de la détonation de l'explosif primaire de l'amorce, d'amplifier l'onde, de la transformer en une impulsion plus puissante encore et suffisante pour induire la détonation du chargement, aussi peu sensible qu'il soit. Les fusées d'artillerie étaient durant la Grande Guerre des dispositifs pyrotechniques d'une grande diversité mais aussi, pour certaines d'entre-elles d'une grande complexité, constituant parfois de véritables pièces de mécanique de précision. Les fusées équipaient les projectiles d'artillerie de campagne, lourde et de tranchée. De nombreux types de fusées furent utilisés durant la Première Guerre mondiale. Les fusées allemandes sont décrites dans toute leur diversité dans le document intitulé « *Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 1er et 2e Bureau. Artillerie Allemande. Les fusées. Paris. Imprimerie Nationale. 1918* [67]». Les fusées étaient rangées en deux catégories (i) les fusées percutantes, qui étaient déclenchées par le choc de l'impact de l'obus sur sa cible (décélération brutale), et (ii) les fusées fusantes, à temps, qui étaient déclenchées à un point précis de la trajectoire du projectile, sous l'action d'un système de temporisation pyrotechnique ou d'horlogerie. Les fusées à double effet (cf. Figure 4) pouvaient fonctionner par un déclenchement fusant et percutant.

Certaines fusées furent spécialement développées pour pouvoir fonctionner à l'impact de sols meubles (comme les terrains détrempés de Flandre) comme la fusée instantanée à refoulement en service dans l'armée britannique. Les fusées allemandes équipant les projectiles chimiques à chargement liquide (dotées de joints d'étanchéité par ciment magnésien (oxychlorure de magnésium) entre fusée et corps de l'obus) sont reconnaissables par une croix frappée à froid (poinçonnée).

[67] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 1er et 2e Bureau. *Artillerie Allemande*. *Les fusées*. Paris. Imprimerie Nationale. 1918.



Fusée instantanée allemande modèle 1916 pour canon de campagne EKZ16 (Empfindliche Kanone Zünder 16). Vues intérieure (à gauche) et extérieure (à droite)[68]. Exemplaire de 1918 collecté sur le terrain (site de désobusage de Noire-Fontaine (Vaudoncourt, département de la Meuse)[69].



Fusée allemande à double effet modèle 1915 Dopp. Z15 umg (ungeändert). Vues intérieure (à gauche) et extérieure (à droite)[70]. Exemplaire collecté sur le terrain (Chemin des Dames)[71].

Figure 4 : Exemples de fusées d'artillerie allemandes.

[68] *Artillerie allemande. Les fusées*, *op. cit.* p. 115.

[69] Hubé, D. (2015).

[70] *Artillerie allemande*. *Les fusées*, *op. cit.,* pp. 256 – 257.

[71] Hubé, D. (2016).

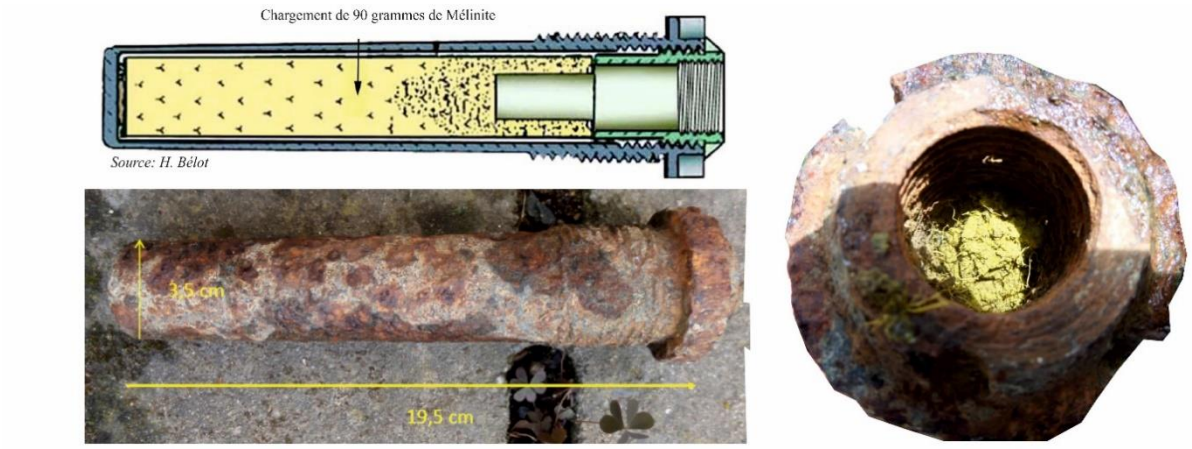


Figure 5 : Gaine-relai modèle 1898 à filetage long armant les obus explosifs français de 270 mm, de 240 mm type Perruchon, les obus spéciaux français de 120 mm à 155 mm en fonte aciérée et les obus spéciaux français en acier de 145 mm et 155 mm modèle 1890. L'exemplaire de droite est encore chargée de Mélinite. Usine Clere & Schwander à Rampont, Muzeray (département de la Meuse)[72].

2.1.3 Chargement des projectiles

Il convient dans un premier temps de distinguer trois types distincts de chargement des projectiles :

1. Les chargements explosifs, encore désigné par « conventionnels »,
2. Les chargements « spéciaux » qui peuvent être chimiques (par des agents agressifs toxiques, irritants, lacrymogènes, suffocants, vésicants, etc.), incendiaires, fumigènes, éclairants, etc.
3. Les chargements à balles et à mitraille.

Le chargement explosif des munitions était formé d'une ou plusieurs substances hautement énergétiques (en mélange) qui doivent posséder deux propriétés essentielles: (i) résister à la violence du coup de départ (ces explosifs doivent être par définition très stables) (ii) détoner comme escompté sous l'effet d'un choc initial induit (par le détonateur) et maîtrisé. Les explosifs de 1914-1918 étaient tous des solides à l'exception de la *Panclastite*[73] (liquide) de certaines bombes d'aviation. Les chargements chimiques étaient en grande majorité liquides (comme ceux à base d'*Ypérite* ou encore désigné par un abus de langage resté dans le langage courant « gaz moutarde ») à l'exception des arsines vomitives allemandes (solides), de la *Vincennite* française (à base de HCN, acide cyanhydrique[74]) et du phosgène ($COCl_2$) gazeux.

Le chargement explosif des projectiles d'artillerie de campagne français de calibre compris entre 37 et 88 mm représentaient 5,4 à 12% du poids des engins. Le graphique de la Figure 6 montre, pour les projectiles explosifs d'artillerie lourde française (calibres 105, 164, 195, 200, 220, 240, 280, 285, 293, 305, 320, 340, 370 et 400 mm), les poids des projectiles et de leur chargement, et le pourcentage du chargement dans le poids total des engins, qui oscille entre 3 et 32%.

[72] Hubé, D. (2015).

[73] Mélange de peroxyde d'azote et d'un hydrocarbure (pétrole, benzène, etc.).

[74] Qui constitue l'un des agents actifs du *Zyklon B* utilisé dans les chambres à gaz durant la Seconde Guerre mondiale.

On constate une grande variabilité des poids des chargements et donc du ratio chargement / poids des engins pour les engins de moins de 200 kg alors qu'au-delà le ratio augmente avec les calibres et les poids des projectiles.

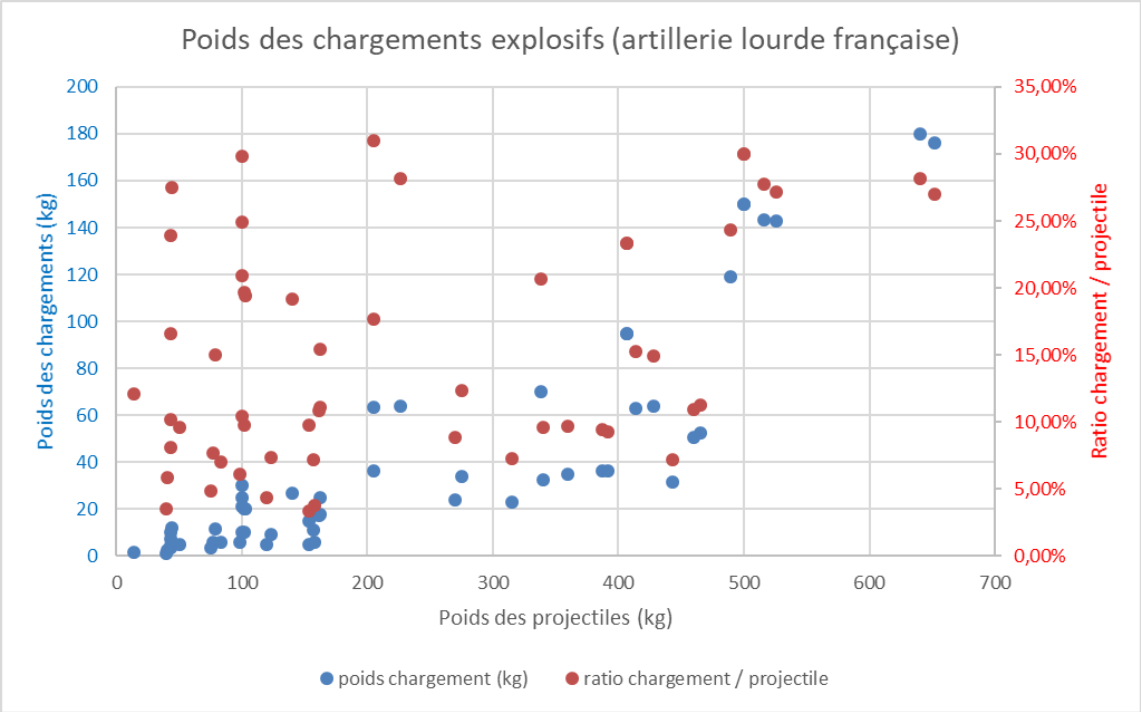


Figure 6 : Poids des projectiles et des chargements des projectiles explosifs de l'artillerie lourde française[75].

Les ratios les plus élevés étaient obtenus pour les projectiles aux parois les plus fines à savoir les engins d'artillerie de tranchée. Ces ratios étaient compris entre 10 et 50% pour les projectiles d'artillerie de tranchée français (cf. Figure 6)[76].

Les explosifs de la Première Guerre mondiale étaient généralement formés par un mélange entre plusieurs substances énergétiques (la recette est désignée par « formulation »), agissant soit en carburant soit en comburant, auxquelles étaient associés des adjuvants (stabilisants, flegmatisants, etc.). On distingue les explosifs (i) nitrés (à base de composés organiques azotés), (ii) nitratés (lorsqu'ils renfermaient des nitrates, majoritairement le nitrate d'ammonium) et (iii) chlorates (*Cheddites*) et perchlorates (*Percheddites*). Les composés azotés prédominants dans les explosifs étaient les composés dits nitroaromatiques (NAC, *NitroAromatic Compounds*) dont la structure chimique repose sur celle d'un (benzène, toluène principalement) ou deux (naphtalène) noyaux benzéniques sur lesquels sont venus se substituer un, deux ou trois groupements fonctionnels nitro- (NO_2^-).

[75] D'après Bélot, H. *Obus français - 65 à 520 mm*. Communication personnelle.

[76] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 51. Secrétariat d'Etat de l'Artillerie et des Munitions. Réponse aux questions posées par le Général Pedoya, Président de la Commission de l'Armée de la Chambre des Députés (lettre du 1er mars 1916).

Parmi ces NAC, on distingue (i) les composés polaires (famille du 2,4,6-trinitrophénol) et (ii) les composés apolaires. KORA (2008) propose la définition suivante pour qualifier la polarité des NAC : les composés polaires sont ceux qui, à pH 7, [77] ne se laissent pas, ou dans de très faibles proportions, extraire de la phase aqueuse au contact du dichlorométhane. S'y associaient des composés nitratés et notamment, selon les chargements, des nitrates d'ammonium (NH_4NO_3) et de sodium ($NaNO_3$).

Le chargement des obus en explosif était effectué soit en « fondu » (l'explosif liquéfié était coulé dans le corps en acier) ou en « comprimé » (l'explosif solide était tassé dans le corps en acier).

2.1.4 Charges de propulsions (ergols)

Ces projectiles étaient vectorisés sur leur cible en étant propulsés à grande vitesse dans les canons par des charges de propulsion non solidaires aux projectiles (contrairement aux roquettes et missiles qui sont des charges autopropulsées). Ces charges étaient encore désignées par « poudres » ou « ergols solides ». Elles étaient soit placées dans des cartouches en laiton solidaires et serties au projectiles (cf. Figure 7 ci-contre), soit amovibles, en sacs, placés derrière l'obus au moment du tir (sacs dénommés « gargousses » pour des pièces d'artillerie de confection anciennes).

Figure 7 : Obus allemands de 77 mm encartouché. Douaumont, département de la Meuse[78].

Les charges propulsives étaient actionnées par la percussion d'amorces placées au culot des cartouches, semblables à celles des fusées, formées pour l'essentiel d'un gramme de fulminate de mercure. Les ergols solides utilisés durant la Première Guerre mondiale étaient majoritairement constitués à base de nitrocellulose conditionnée en plaquettes, granules, brindilles en fagots, etc. La nitrocellulose était stabilisée par des adjuvants (comme les phénylamines et phénylurées). D'autres permettaient de contrôler les vitesses de déflagration.

2.1.5 Coup complet

L'ensemble [projectile + charge de propulsion] constitue ce qui est appelé « un *coup complet* » (cf. Figure 8 et Figure 9). Dans un coup complet français, les matières énergétiques se répartissaient en 1916 dans les proportions en masse de 60% d'explosifs et de 40% de poudres propulsives[79].

---

[77] Joos, A. (2008). KORA. Themenverbund 5 (TV5). Rüstungsaltlasten. *Leitfaden. Einschätzung und Berücksichtigung natürlicher Schadstoffverminderungsprozesse auf Standorte die mit sprengstofftypischen Verbindungen sowie deren Transformationsproduckten belastet sind. Prozessverständnis, Methoden, Referenzstandorte. Empfehlungen und Hinweise zur Eizelfallbeartbetung*. p. 30.

[78] Collection particulière, Cardem-Pyro. Février 2012. Communication personnelle.

[79] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 51. Sénat. V^e^ rapport fait à la Commission de l'armée sur les Poudres et Explosifs de Guerre par Henry Berenger, Sénateur (adopté le 20 mars 1916).

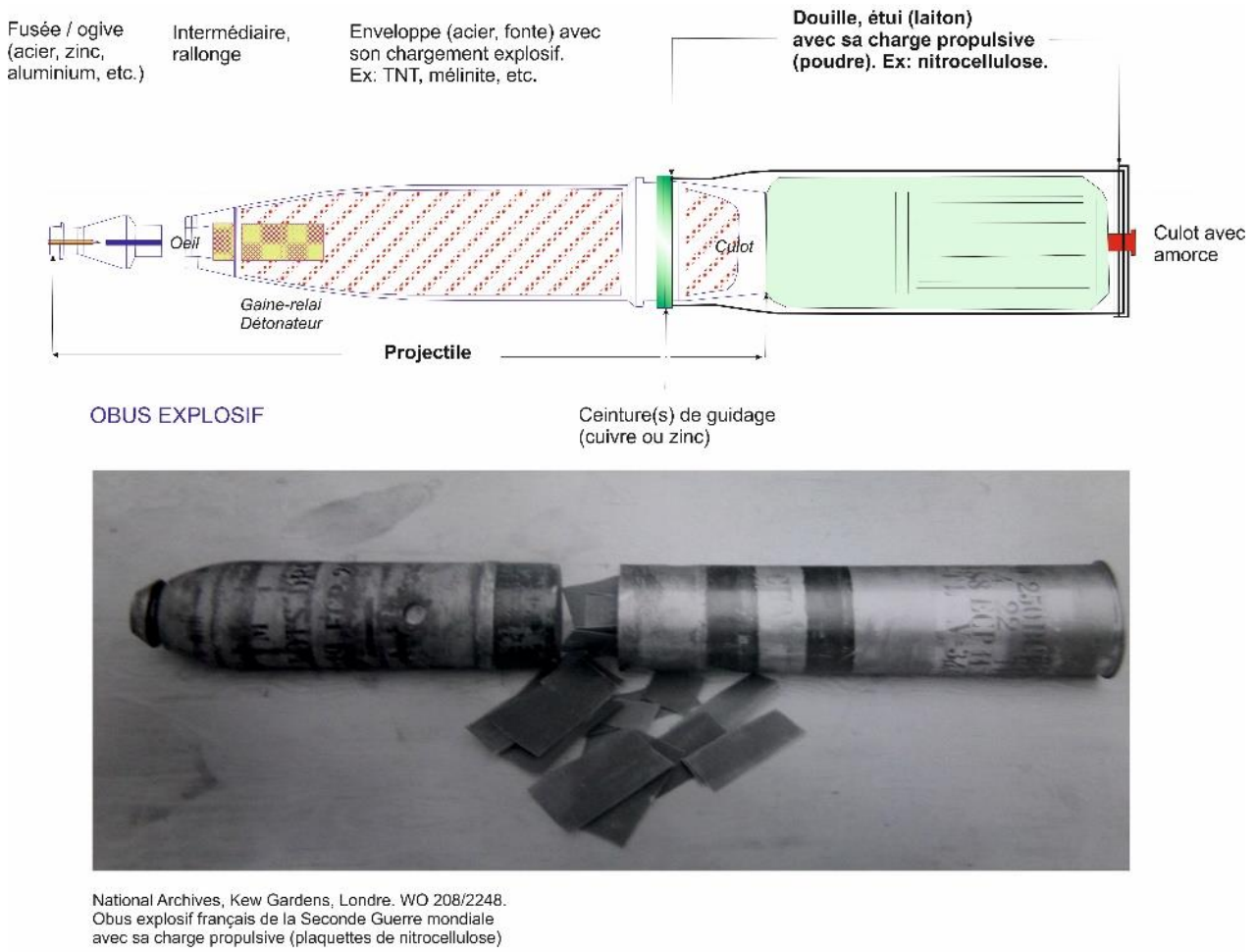


Figure 8 : Schéma de principe d'un coup complet comprenant un obus explosif[80].

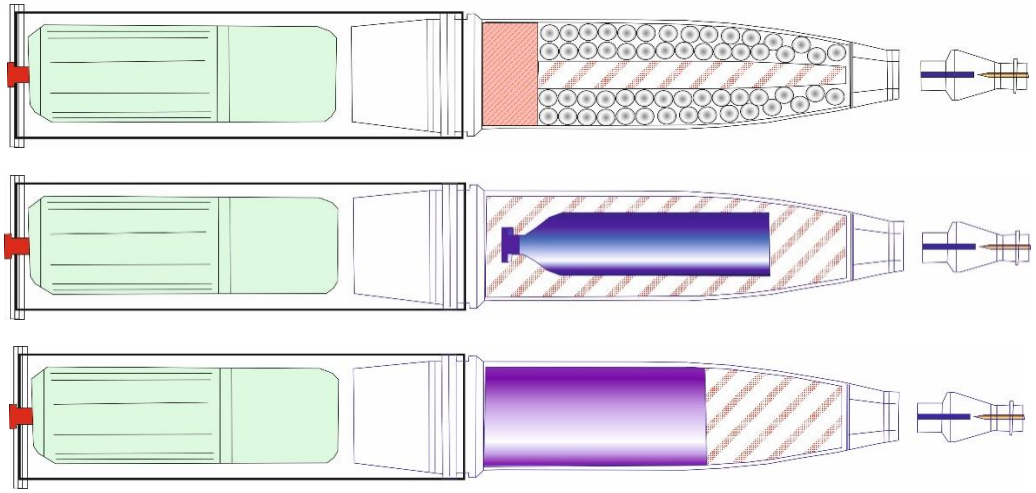


Figure 9 : Coups complets d'obus à balles à charge arrière (en haut). chimique à Croix bleue (renfermant un fiole d'arsine vomitive) (au centre) et chimique à réservoir (renfermant un toxique liquide) (en bas) (schéma de principe)[81].

[80] Hubé, D. (2015).

[81] *Ibid.*

2.2. DIVERSITE DES PIECES D'ARTILLERIE.

2.2.1 L'artillerie de campagne

L'artillerie légère et mobile, était désignée par « artillerie de campagne ». Les canons de campagne (artillerie de campagne, *Feld Artillerie* pour les Allemands, et *Field Artillery* pour les Britanniques), légers et mobiles, comme le 75 mm français modèle 1897 ou, côté allemand, le moderne canon de 77 mm FK96 n/A et l'obusier léger de 105 mm lFH 98/09 étaient des pièces maîtresses de l'artillerie de campagne des principales parties belligérantes sur le front occidental. L'artillerie de campagne britannique comptait sur ses canons de campagne de *18-pounder* et de *13-pounder* (plus légers et destinés à l'artillerie à cheval) et ses obusiers de campagne de 4,5 *inch*. Ces matériels permettaient le tir direct, tendu, en salves sur des objectifs distants de plusieurs kilomètres. L'artillerie de montagne, mobile et légère, démontable et transportable à dos d'homme, était généralement rangée au sein de l'artillerie de campagne. L'artillerie anti-aérienne est aussi dérivée de pièces d'artillerie de campagne.

2.2.2 L'artillerie lourde

Des pièces lourdes modernes furent également mises au point dans la Grande Guerre et entrèrent en service dans l'Artillerie ; elles étaient capables de tirer avec précision des projectiles de plusieurs dizaines de kilogrammes (notamment de calibre 150, 155, 210, 320 mm) à plus de 10 km. C'est l'Allemagne avec les usines Krupp et Skoda qui se montra pionnière dans ce domaine dès le début de la guerre alors que les pièces lourdes françaises étaient anciennes et obsolètes. L'Allemagne disposait dès le début du conflit l'artillerie lourde la plus puissante et la plus moderne au monde, avec près de 2 400 canons et obusiers lourds (de campagne (536 pièces), de siège (1028 pièces) ou de forteresse (831 pièces)). La France ne rattrapa son retard sur l'Allemagne qu'en 1917. Les Britanniques se dotèrent aussi progressivement d'une artillerie lourde avec des canons et obusiers BL-6 et BL-60. Des pièces d'artillerie de marine de gros calibre furent aussi utilisées sur affût fixe (comme les SLK 380 pour *Sehr Lange Kanone*, ou *Long Max* allemands de calibre 380 mm) ou mobile sur voie ferrée (ALVF pour Artillerie Lourde sur Voie Ferrée) (cf. Figure 10). Les Français mobilisèrent aussi des pièces d'artillerie de marine sur terre, avec pour servants des artilleurs de la marine, des pièces de bâtiments cuirassés inutiles en tourelles car ces navires n'ayant pas à combattre sur les mers (à l'origine des régiments d'artillerie de marine actuellement stationnés loin des façades maritimes). Les portées étaient de plusieurs dizaines de kilomètres ce qui autorisait des frappes en profondeur dans les arrières lignes ennemies.

2.2.3 Les obusiers

Lorsque la hausse du canon excède 45°, on parle d'obusier (ou *Howitzer*[82]). L'obusier a un tir en cloche, selon une trajectoire parabolique, semblable à celle des projectiles d'artillerie de tranchée (mais de portée plus grande). Ce type de trajectoire offre une grande précision au tir qui peuvent aussi atteindre, par un impact à forte incidence, le cœur des retranchements adverses.

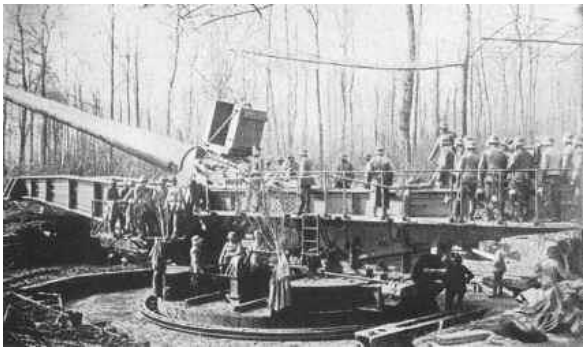
[82] Ce terme d'origine tchèque, signifiant « catapulte », datant de l'empire d'Autriche-Hongrie, est utilisé notamment aux États-Unis et en Allemagne, est un mot.

Les obusiers les plus célèbres de la Première Guerre mondiale sont ceux, lourds, de siège de 420 mm (*42-cm M-Gerät 14 Kurze Marinekanone L/12, Dicke Bertha, Fleissige Bertha*), plus connus sous le nom de « Grosse Bertha » ainsi nommé en l'honneur de Bertha Krupp, la fille unique et héritière de Friedrich Krupp, le fabricant de ce modèle de canons (cf. Figure 10). Les obusiers sont des pièces de siège et se rangent en général dans l'artillerie lourde.

2.2.4 L'artillerie spéciale

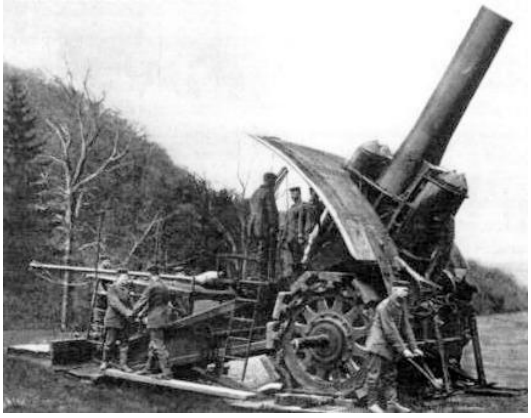
A noter qu'apparait aussi durant la Grande Guerre ce que les Français ont d'abord désigné dans leurs rangs « artillerie spéciale » et qui deviendra l'arme blindée mobile (actuelle ABC « Armée Blindée Cavalerie), le char. Les Allemands, peu confiants dans l'efficacité de cette arme, ne misèrent pas sur son développement contrairement aux Britanniques qui engagèrent dès 1916 et la Bataille de la Somme des chars lourds de 25 tonnes (les chars *Mark I* et *Mark II*, mâles ou femelles). Les Français quant à eux privilégièrent des chars moyens ou légers (comme le char Renault FT-17), plus rapides et plus maniables (cf. Figure 10).

La première attaque des chars Renault eut lieu le 31 mai 1918, sur le flanc ouest des troupes allemandes dans la seconde offensive du printemps (opération *Blücher*) au sud du Chemin des Dames et de l'Aisne. Ces matériels roulants, tout terrain, blindés, permettaient d'accompagner la progression de l'infanterie par celle de la puissance de feu dans la guerre de mouvement de 1918. Les chars lourds français Saint-Chamond participèrent à l'assaut de l'offensive Nivelle sur le Chemin des Dames en avril 1917.



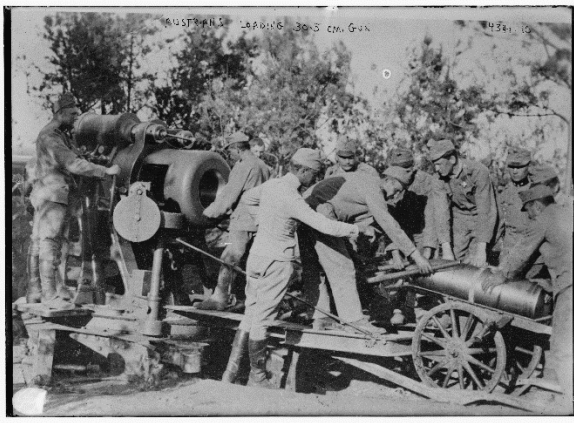
Pièce de marine allemande de 380 mm Long Max

Tir nocturne d'une pièce de marine française de 400 mm d'ALVF



Obusier lourd de siège allemand de 420 mm Grosse Bertha »

Tir de nuit d'une pièce lourde par des artilleurs canadiens



Artilleurs autrichiens chargeant un obus de 305 mm par la culasse (1915)

Chars français légers Renault FT de la Ier Armée américaine se déployant en Argonne en 1918. « Artillerie spéciale »

Figure 10 : Exemple de pièces d'artillerie de la Grande Guerre[83].

[83] Du haut à gauche en bas à droite : (i) US War Department — *Railway Artillery: A Report on the Characteristics, Scope of Utility, Etc., of Railway Artillery*, Volume I, page 30, by Harry W Miller, United States Army Ordnance Department. Washington, Government Print Office, 1921. National Archives, Kew Gardens, London, number WO 208 / 2248, (ii) Collection particulière, (iii) Marc Romanych. *Dicke Bertha. Propaganda photograph of an emplaced prototype Big Bertha howitzer*, (iiii) Bibliothèque et Archives Canada, cote MIKAN 3628742, (iiiii) GL Archive / Alamy Stock Photo. 1915, (iiiiii) La Meuse Argonne https://www.g191914-1918.com/argonne.html.

2.2.5 L'artillerie de tranchée ou artillerie d'infanterie

Il s'agissait des mortiers et lance-bombes, permettant de vectoriser à courte distance, avec précision, selon une trajectoire parabolique (cf. Figure 11), des engins puissants au cœur même des dispositifs défensifs adverses. Les portées étaient de l'ordre de quelques centaines de mètres. Les *Minen* moyennes (comme celles de 175 mm) et lourdes allemandes (de 250 mm) avaient des portées entre 106 à 775 m[84].Cette artillerie de combats rapprochés, désignée par « artillerie de tranchée », est aussi communément appelée « artillerie d'infanterie » car opérée par du personnel d'unité d'infanterie au contact du front et non à distance par des artilleurs.

La particularité du tir de ces projectiles de mortier était leur faible cinétique au coup de départ, de l'ordre de 50 à 150 m/s, qui permit de doter ces engins, peu sollicités mécaniquement, de fines enveloppes en acier (moins de 1 cm d'épaisseur), et donc de fortes charges explosives (jusqu'à 195 kg) très puissantes. Ces explosifs pouvaient être moins stables que ceux de l'artillerie traditionnelle à tir tendu et forte vitesse d'expulsion. La propulsion des projectiles d'artillerie de tranchée était assurée par des cartouches de *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol), de poudre noire ou encore de compositions nitrocellulosiques comme la *Blastine*.

Ces matériels initialement obsolètes ou résultant de bricolages improvisés et du système « D », se développèrent et se spécialisèrent drastiquement notamment dès 1916. Ces engins étaient d'une grande diversité de calibres et de chargements (conventionnels ou chimiques). Les canons d'artillerie de tranchée possédaient une âme lisse ou rayée. Ils prirent dans l'armée allemande le nom de *Minenwerfer* (littéralement « lanceur de bombes »). Les Français eurent essentiellement recours à des bombes empênées à quatre ou six ailettes dont le célèbre projectile 58T (projectile pour canon de tranchée de calibre 58 mm) mieux connu sous le nom de « Crapouillot ». Les Britanniques mirent au point puis utilisèrent au front des bombes de tranchées plus originales comme les projectiles *Stokes* (en forme de pot d'échappement) ou le projectile *Vickers* (en forme de pomme d'amour, *Toffee Apple*). Le projectile britannique *Livens* était spécifiquement chargé d'agents chimiques de guerre (cf. Figure 12).

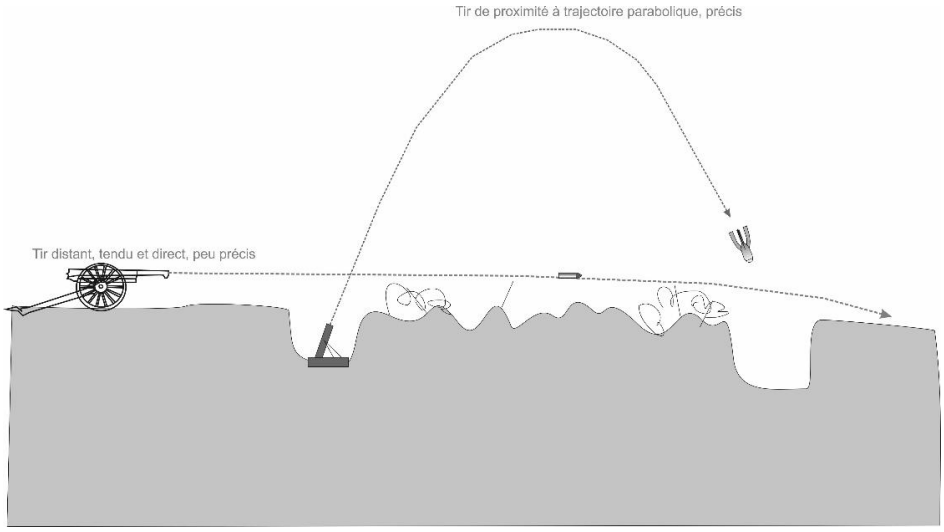


Figure 11 : Tir tendu et tir à trajectoire parabolique.

[84] Service Historique de la Défense. Secrétariat d'Etat de l'Artillerie et des Munitions. Réponse aux questions posées par le Général Pedoya, *op. cit.*

Mortier français 58 T n°2 avec une bombe à ailette (« Crapouillot) en position de tir

Bombe LS ou DLS à 6 ailette en acier de mortier français 58 T Juvincourt (Aisne). Source: Cardem-pyro

Bombe à ailette en acier de 16 kilos de mortier français 58 T Juvincourt (Aisne). Source: Cardem-pyro

Chargement par les servants d 'un projectile de *Minenwerfer* lourd

Projectiles de *Minenwerfer* (bombes de tranchées) Vimy-Thélus (Pas-de-Calais). Source: Cardem-pyro

Projectile de calibre 76 mm de *Minenwerfer* léger allemand « pétardé » et montrant au culot le logement de la charge propulsive dont les gaz s 'échappaient par les 6 trous bien visibles sur ce cliché. Terrain de destruction Clere é Schwander de Vaudoncourt (Meuse)

Arbalette lance-grenade française « Sauterelle » Type A d 'Imphy

Projectiles d 'artillerie de tranchées et grenades après leur découverte à Vimy-Thélus (Pas-de-Calais) (source: Cardem-pyro)
1) Projectile « Toffee Apple » de mortier britannique de 2' '
2) Boites d 'explosifs de grenades à main allemandes sans leur manche en bois
3) Grenades à fusil à tige
4) Projectiles de 80 mm de mortier britannique Stockes

Vol erratique d 'un projectile de tranchée allemand au départ du coup.

« Taube » (tourterelles): projectiles explosifs du lance-grenade allemand « Kleine Priester » (petit curé) produisant à l 'explosion des 225 gr. de charge 96 éclats. (Source: H. Bélot)

Vol d 'un projectile de mortier britannique de 2" « Toffee Apple » au départ du coup.

Projectiles de 80 mm de mortier britannique Stockes après leur découverte à Vimy-Thélus (Pas-de-Calais) (source: Cardem-pyro)

Projectiles de 80 mm de mortier britannique Stockes (source: H. Bélot)

Figure 12 : Quelques projectiles de tranchées de 1914-1918. Aperçu photographique[85].

[85] (i) Collection particulière, Cardem-Pyro. Communication personnelle (ii) Collection particulière, Bélot, H. communication personnelle, (iii) Reibert, T. (2013). *Die Entwicklung des Granatwerfers im Ersten Weltkrieg Die Entstehung eines neuartigen Waffentyps als Reaktion auf die Bedingungen des Stellungskrieges.* Dissertation zur erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg vorgelegt im Fachbereich Mathematik.

2.2.6 Artillerie de place

L'artillerie de forteresse ou de place, qui peut être lourde (comme au fort de Mutzig dans le département du Bas-Rhin) ou de campagne, était fixe et dota les forts protégeant certaines places fortes (*Festen* allemandes et forts Séré de Rivières côté français).

2.3. GRENADES

Les grenades offensives étaient des engins explosifs de petit calibre projetés sur la cible à courte distance pour ensuite exploser après un court laps de temps. Les grenades étaient projetées soit à la main, soit par une cartouche au moyen d'un fusil (grenades à tromblon). Il existait durant la Grande Guerre une grande diversité de grenades : grenades ovoïdes « œuf », grenades discoïdes, grenades à manche (allemandes), etc. Elles étaient actionnées par des détonateurs fusants. Durant la Grande Guerre, les circonstances de la guerre stimulèrent l'imagination, et en réaction le recours au système D pour projeter plus efficacement les grenades. Certaines photographies montrent l'usage de catapultes, de frondes formées de lanières élastiques ou encore d'arbalètes (dénommées « Imphy », du nom de l'aciérie française de la Nièvre). Ces matériels semblant sortis d'un autre temps côtoyèrent au front des matériels d'une grande modernité.

2.4. BOMBES D'AVIATION

Durant la Première Guerre mondiale, les premières bombes d'aviation étaient « *bricolées* » au front en transformant des projectiles d'artillerie (en les dotant d'empennages, etc.). Puis des engins furent spécialement développés et produits pour le bombardement aérien (par avion ou par dirigeable). Les bombes d'aviation étaient des engins explosifs en général largués d'un avion. Elles présentaient de multiples formes et tailles. Généralement en métal, elles se caractérisaient par une forme habituellement aérodynamique, lisse et incurvée. Le corps en acier (ou en aluminium) était pisciforme (supersonique) ou cylindro-ogivale (subsonique) à faible trainée. Le corps comportait une ogive et un culot. A l'exception des bombes françaises à la panclastite[86], le chargement explosif des bombes d'aviation était similaire à celui des projectiles d'artillerie. La bombe la plus lourde était allemande avec une masse de 1 000 kg (cf. Figure 13 ci-contre).

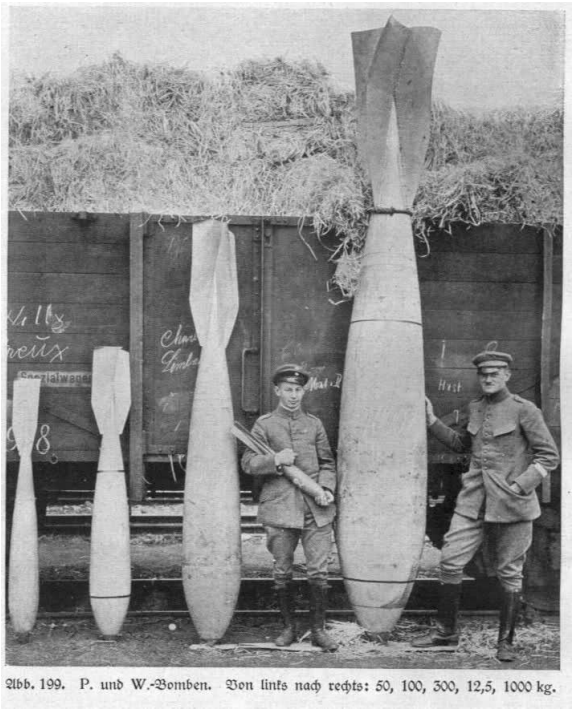


Figure 13 : Bombes d'aviation allemandes de (gauche à droite) 12,5, 50, 100, 300 et 1 000 kg[87].

[86] Mélange de peroxyde d'azote et d'un hydrocarbure (pétrole, benzène, etc.).

[87] Granger Photo Prints and Wall Art. World War One : german bombs. German aerial bombs, with a one-thousand kilogram gift.

2.5. AUTRES MATERIELS PYROTECHNIQUES

A noter que durant la Première Guerre mondiale, les explosifs et autres matières énergétiques furent aussi utilisés directement, sans être confinés dans une enveloppe métallique comme dans le cas des chargements de projectiles. Des explosifs en vrac (pains conditionnés dans de simples enveloppes faites de papier ou carton paraffinés) furent utilisés pour confectionner des charges de destruction massives (dénommées « fourneaux ») à intentions offensives ou défensives pour mener une guerre obsidionale dans la lithosphère connue sous le nom de guerre de mines.

Enfin, d'autres engins pyrotechniques furent utilisés au front : signaux lumineux colorés (pour la communication d'instructions à distance), torches et engins éclairants (sous parachute) pour illuminer de nuit le champ de bataille et pouvoir observer d'éventuels mouvements hostiles dissimulés par l'obscurité. La Première Guerre mondiale vit aussi l'usage sur le champ de bataille de ce qui est de nos jours désigné par « Engin Explosif Improvisé (EEI) », un « *Dispositif mis en place ou réalisé de façon improvisée et contenant des produits chimiques destructeurs, létaux, toxiques, pyrotechniques ou incendiaires. Il est conçu dans le but de détruire, neutraliser, harceler ou distraire. Il peut comprendre des éléments militaires, mais est généralement constitué de composants non militaires*[88] ». Des boîtes de conserve étaient ainsi bourrées d'explosifs et projetées sur les positions ennemies, etc.

2.6. DEFINITIONS ET GENERALITES CONCERNANT LES MATIERES ENERGETIQUES ET AGRESSIVES DES CHARGEMENTS

2.6.1 Régimes de déflagration et détonation des matières énergétiques

Une explosion peut résulter d'une réaction chimique. Le volume occupé par les gaz produits par la réaction est supérieur au volume des réactifs. Selon Corbin (1915). « *On appelle « explosif » un mélange ou composé chimique susceptible de se transformer en dégageant rapidement une grande quantité de gaz à haute température* [89]». La réaction est hautement exothermique et la chaleur provoque une dilatation des gaz de réaction. De l'explosion résulte la création d'un front d'onde de pression (onde de choc et souffle). La vitesse de ce front d'onde détermine la classification des explosifs.

Selon un règlement de l'Union européenne daté du 16 décembre 2008 (Règlement CE n 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE n° 1907/2006), les substances explosibles sont des solides ou liquides susceptibles de dégager des gaz à une température, une pression et une vitesse telles qu'il en résulte des dégâts dans la zone environnante. Alors que les substances pyrotechniques quant à elles sont destinées à produire un effet calorifique, sonore, gazeux ou fumigène à la suite d'une réaction chimique non détonante. C'est donc le caractère détonant, et par conséquent les dégâts que cela peut engendrer qui différencie les substances pyrotechniques et les substances explosibles.

---

[88] Lexique relatif à l'EEI du service des Nations Unies pour la lutte antimine. https://www.unmas.org/sites/default/files/unmas_ied_lexicon_french_0.pdf

[89] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 4 W 713. Archives de l'artillerie. Corbin M.P., administrateur – délégué de la « Société Universelle des Explosifs ». Conférence sur les explosifs chloratés et perchloratés au centre d'instruction de la pyrotechnie à Bourges à M.M les Officiers bombardiers. 1er juillet 1915.

Au regard de ces modalités de décomposition, il existe deux grands groupes de matières énergétiques :

- Les poudres (qui se décomposent suivant un régime de déflagration) ;
- Les explosifs brisants (qui se décomposent suivant un régime de détonation). Les composés hautement explosifs se caractérisent par des vitesses de détonation très élevées générant une onde de choc et un souffle (Van Deuren et al., 1977[90]).

La différence entre les régimes de déflagration et de détonation n'est pas toujours simple. Selon les conditions d'utilisation, un explosif normalement déflagrant peut détoner, et un explosif normalement détonant peut déflagrer. Les poudres (ergols) sont conçues pour un régime de déflagration, c'est-à-dire qu'elles se décomposent thermiquement selon une onde subsonique (de 10 à 400 $m.s^{-1}$). Les explosifs suivent le régime de détonation. La détonation se caractérise par un front exothermique supersonique (généralement de 2 000 à 3 500 $m.s^{-1}$) et une surpression importante (jusqu'à 20 bars). Les explosifs brisants détonent à des vitesses très élevées (de 4 000 à 9 000 $m.s^{-1}$). Le plus puissant connu atteint la vitesse de détonation de 9300 $m.s^{-1}$. La *Mélinite* (connue sous le nom d'acide picrique de formule 2,4,6-trinitrophénol) n'est plus utilisée de nos jours, mais sert d'étalon pour donner le Coefficient d'Utilisation Pratique (CUP) d'un explosif, mesurant sa puissance. La détonation d'une matière énergétique se produit lorsque celle-ci est confinée dans une enveloppe métallique. A l'air libre, elles se consument vigoureusement. Les explosifs qui entrent en détonation produisent des pressions de 36 000 à 360 000 atmosphères en moins de quatre microsecondes et l'onde de choc se propage alors à la vitesse de 2 500 à 10 200 $m.s^{-1}$ pour les explosifs les plus modernes. La détonation génère une boule de feu de deux à dix secondes de dimension d'un facteur équivalent à 1,2 à 1,5 fois la charge initiale ayant détonée. Les explosifs dits « progressifs » se situent entre les poudres et les explosifs brisants.

[90] Van Deuren, J., Wang, Z., Ledbetter, J., (1977). « Properties and Behavior of Explosives » in *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 3rd ed.* http://www.frtr.gov/matrix2/sectionl/toc.html [November 28, 2001].

2.6.2 Classification et catégories de matières énergétiques

Généralités

Les produits énergétiques sont communément regroupés sous l'abréviation PEP, acronyme anglo-saxon pour « *Propellants, Explosives and Pyrotechnics* ». Il désigne tous les produits énergétiques issus de l'industrie civile ou militaire. Ils peuvent être classés comme suit (cf. Figure 14):

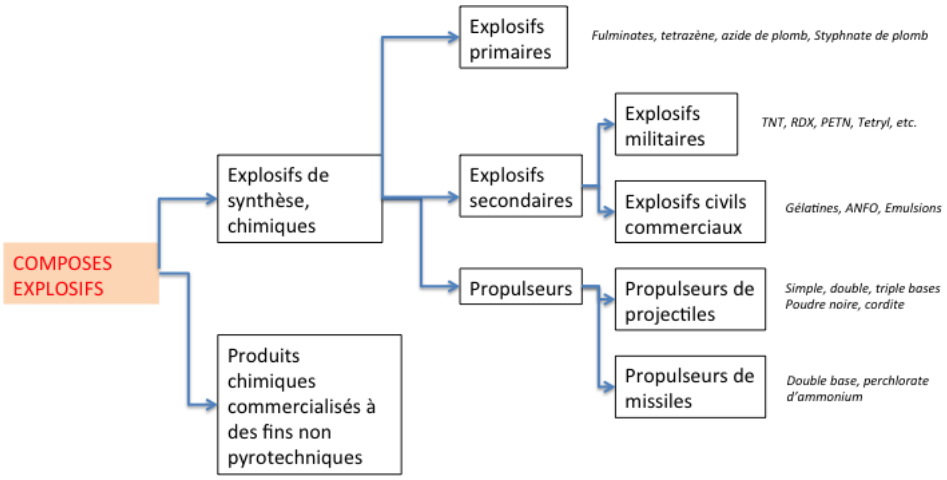


Figure 14 : Classification des matières énergétiques [91].

Ces matières sont susceptibles de détoner ou de déflager sous l'effet d'un apport d'énergie, sous la forme d'un choc, de friction ou de chaleur.

Les matières explosibles (qui détonent) peuvent être classées en deux catégories, selon leur sensibilité aux chocs et à la friction (les explosifs primaires et secondaires). Les matières qui déflagrent forment la grande catégorie des poudres et ergols.

Les explosifs primaires

Un explosif est dit primaire lorsqu'il est extrêmement sensible à n'importe quelle source d'énergie même infime tel qu'un impact (choc), de la chaleur, de l'électricité statique, de la friction ou encore des ondes électromagnétiques. Ces explosifs primaires sont souvent utilisés comme amorce pour déclencher la détonation des explosifs secondaires.

Des amorces équipent aussi le culot des cartouches et étuis des projectiles d'artillerie encartouchés pour, après percussion, initier la déflagration de la charge de poudre et propulser un projectile. Parmi les substances considérées comme des explosifs primaires, les plus communes sont le styphnate de plomb (2,4,6-trinitrorésorcinate de plomb), le fulminate de mercure, les azotures d'argent et de plomb. Les explosifs primaires les plus couramment employés durant la Première Guerre mondiale étaient le fulminate de mercure ($C_2HgN_2O_2$) et l'azoture du plomb (PbN_6).

[91] D'après, J. Akhavan, (2004). *The Chemistry of Explosives.* Published March 29th 2004 by Royal Society of Chemistry, modifié.

Les explosifs secondaires

Un explosif secondaire est moins sensible aux petites sources de chaleur, aux chocs, à la friction que l'explosif primaire. En effet, il a besoin d'un apport en énergie plus important porté par un explosif primaire dans la majeure partie des cas. La stabilité des explosifs secondaires est nécessaire lorsque ces derniers chargent des projectiles d'artillerie, afin de pouvoir résister au choc du coup de départ du tir.

Par nature, les explosifs sont des composés très stables dans les conditions de pression et de température standards. Les explosifs secondaires peuvent se diviser en deux grandes catégories selon leurs formulations (quantités relatives des divers composés entrant dans un mélange):

1. Les explosifs simples, constitués par un seul agent explosif énergétique ;

2. Les explosifs binaires ou ternaires (composites ou mixtes), formés par un mélange d'explosifs énergétiques (carburant) associé à un agent comburant hautement énergétique.

Les ergols solides (poudres propulsives)

Les ergols sont les propulseurs, encore communément désignés par le terme générique et historique de « poudres ». Le régime de décomposition thermique est alors la combustion / déflagration qui doit être très bien maîtrisée (et notamment ne pas être plus rapide que le temps de séjour d'un projectile tiré dans l'âme du canon). La vitesse de décomposition thermique à l'ignition des ergols est moins élevée que pour les explosifs (< 1 500 $m.s^{-1}$). C'est le principe du pétard et du feu d'artifice dont le fonctionnement répond au régime de déflagration.

Un monergol est un ergol de formation souvent endothermique, qui a la propriété de se suffire à lui-même pour assurer la réaction chimique. C'est le cas par exemple de l'hydrazine. Lorsque la présence d'un catalyseur est nécessaire, il porte alors le nom de catergol. Le propergol contient à la fois le combustible et le comburant comme par exemple le perchlorate (ClO_4^-, comburant) d'ammonium (NH_4^+, carburant). Un propergol est dit diergol, ou biergol, lorsqu'il est constitué de deux ergols stockés séparément. C'est le cas de la plupart des propergols liquides propulsant les fusées. Il existe deux types de propergols : les propergols solides et les propergols liquides. Dans le cas des munitions des deux conflits mondiaux seuls les ergols solides ont été utilisés à des fins militaires. Un propergol solide est un produit métastable : il est à l'état solide et stable à température ordinaire, et instable à température élevée. Il peut être soit homogène comme la nitrocellulose, soit hétérogène avec un combustible finement disséminé dans la masse du comburant. Pour améliorer les performances des propergols solides, une technique consiste à incorporer une faible quantité de produit explosif.

Les propergols solides offrent l'avantage d'être stables et facilement entreposables, mais possèdent l'inconvénient majeur de ne pouvoir arrêter la combustion, une fois celle-ci commencée. L'ergol solide est extrudé encore pâteux, en cordons, puis tronçonné en fines plaquettes ou fines granules avant leur solidification par évaporation des solvants. L'autre forme est celle d'une poudre compactée, dont les granules peuvent se détacher sur une surface de combustion relativement régulière. Pour la propulsion des munitions durant la Grande Guerre, les propergols simples (mono-ergols, comme la nitrocellulose), double-base (bi-ergols, comme ceux, par exemple, à base de nitrocellulose et de nitroglycérine) voire triple-base (tri-ergols) furent utilisés.

Les adjuvants des poudres et explosifs

Des adjuvants furent parfois ajoutés aux substances actives explosives. Les stabilisants sont des composés chimiques mélangés aux poudres et explosifs pour les sécuriser (de la dégradation chimique, par exemple par l'hydrolyse acide des esters nitriques). Les stabilisants captent les acides libres et les gaz nitrés exsudant des ergols en formant des composés stables et non agressifs. Selon Köhler & Meyer (1991)[92] on distingue (i) les stabilisants *sensu stricto*, (ii) les stabilisants et gélifiants. Parmi les gélifiants jouant aussi le rôle de stabilisants, on retrouve :

- Les résines diphénylamine diphényl (« *Akardite I* »), méthyl-diphényl (« *Akardite II* »), résines éthyl-diphényl (« *Akardite III* ») ;
- Les résines diéthyldiphényl (« *Centralite I* »), diméthyldiphényl (« *Centralite II* »), méthyl-éthyl (« *Centralite III* ») ;
- Les éthyl- et méthylphenyluréthane tout comme diphényluréthane.

Tout comme les (2,4-, 2,6-) dinitrotoluènes, ces adjuvants étaient des dissuasifs (ou modérants), destinés à ralentir la vitesse de combustion.

2.6.3 Chargements spéciaux

Durant la Grande Guerre, au côté des chargements conventionnels, explosifs et à balles (ou à mitraille), on vit apparaître sur les champs de bataille des engins incendiaires, éclairants. Certains adjuvants aux explosifs étaient destinés à produire de la fumée à l'éclatement (agents fumigènes) pour permettre au artilleurs d'apprécier la localisation des points d'impact et d'ajuster si nécessaire les tirs. Ces agents fumigènes étaient notamment associés aux munitions chimiques, dont la faible charge explosive ne produisait pas assez de fumée pour que leurs impacts soient visibles à distance.

Une arme chimique est, selon le dictionnaire du Département de la Défense des Etats-Unis, une arme libérant « *une substance chimique qui, lors d'une opération militaire, a pour effet de tuer, de blesser ou d'incapaciter temporairement un homme par les effets physiologiques qu'elle provoque*[93] ». On distingue parmi les agents agressifs que ces projectiles renfermaient :

- <u>Les toxiques mortels (ou létaux)</u>: (i) toxiques suffocants, (ii) toxiques vésicants, (iii) toxiques cellulaires, (iv) hémotoxiques, (v) neurotoxiques et certaines toxines.

- <u>Les agents incapacitants</u>, dont certains peuvent présenter une toxicité très élevée : (i) irritants lacrymogènes, (ii) irritants sternutatoires et émétisants (arsines), (iii) urticants, (iv) psychotoxiques et (v) labyrinthiques.

[92] Köhler, Josef, Meyer, Rudolf (1991). *Explosivstoffe*. Verlag: Wiley-VCH.

[93] United State Department of Defence, US Department of Defence. *Dictionary of Military Terms*, Arco, New York, 1988, p. 65. Cité dans Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre chimique. 1914-1918*. Presses Universitaires de France, p. 11.

3. Composition des poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale.

3.1. OBJECTIFS ET DEMARCHE DE LA RECHERCHE

La nature, la composition des poudres et explosifs, ayant notamment chargé les munitions de la Première Guerre mondiale sur le front occidental, ainsi que leurs origines, leurs évolutions au cours du conflit, sont explorées et exposées dans ce qui suit. L'objectif est de disposer d'un panorama le plus exhaustif possible de l'ensemble des composés et substances présents dans les munitions et matières énergétiques et susceptibles d'avoir été introduits dans l'environnement par leur production, usage, voire abandon et destruction. Une attention et un développement particuliers ont été accordés dans cette recherche aux formulations explicitement (per)chloratées, provenant de toutes les parties belligérantes, mais aussi aux formulations susceptibles de l'être implicitement du fait de la nature des matières premières et des procédés industriels nécessaires à leur production. Dans cette perspective, une approche originale transdisciplinaire a été retenue, couplant, (i) une recherche historique classique se basant sur une documentation de référence et un corpus d'archives émanant de différents fonds spécialisés, puis (ii) une recherche chimique analytique par la caractérisation originale d'échantillons de poudres et d'explosifs collectés sur le terrain à la faveur de découvertes sur les anciens champs de bataille et de sites ayant neutralisé les munitions anciennes résiduelles de la Grande Guerre *post-bellum* et, enfin, (iii) une recherche analytique isotopique sur certains échantillons d'explosifs bien spécifiques, pour la caractérisation de la signature naturelle ou synthétique (*Fingerprint*) des ions perchlorate lorsque ces derniers ont été détectés par la chimie analytique.

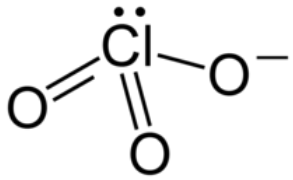
3.2. APPROCHE DOCUMENTAIRE ET HISTORIQUE

3.2.1 Occurrence de chlorates (ClO_3^-) et perchlorates (ClO_4^-) dans les poudres et explosifs

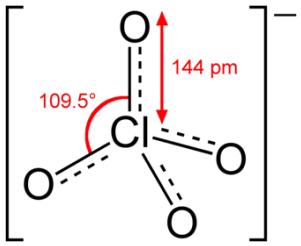
Origines des ions chlorate et perchlorate

- **Introduction / définition**

Les ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-) sont des oxyanions du chlore à des états d'oxydation respectifs de 5+ et 7+. Ils forment des sels cristallisés dans les conditions P, T standards, très solubles dans l'eau, avec des cations alcalins et métalliques très divers (H^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Li^+, Ba^{2+}, NH_4^+, etc.). Chlorates et perchlorates ne sont pas volatils. Les sels de chlorate sont particulièrement hygromorphes. Les sels d'usages les plus courants sont (i) le perchlorate d'ammonium NH_4ClO_4, (ii) le perchlorate de sodium $NaClO_4$ et (iii) le perchlorate de potassium $KClO_4$. L'acide perchlorique $HClO_4$ est l'acide simple le plus fort ; il est instable à l'état anhydre, avec un point d'ébullition vers 16°C, et a tendance à former une vaste gamme d'hydrates (appelés hydronium ou oxonium perchlorates). L'anion chlorate ClO_3^- et l'anion perchlorate ClO_4^- ont une configuration pyramidale à base triangulaire, l'atome de chlore étant lié à leur base à trois atomes d'oxygène (cf. Formules structurales ci-dessous, Figure 15).



Formule structurale de l'Ion chlorate



Formule structurale de l'ion perchlorate

Figure 15 : Formule structurale des ions chlorate et perchlorate.

- **Ions perchlorate naturels**

Il n'est fait aucune mention dans les documents et la littérature scientifique consultés dans le cadre de la présente recherche à l'existence dans l'environnement de sels de chlorate naturels. Par contre, les ions perchlorate peuvent être naturellement présents dans certains environnements extrêmes et particuliers, notamment dans les régions semi-arides et arides, où ils peuvent s'accumuler dans les dépôts salins (*salars*) comme ceux des hauts plateau du désert d'Atacama dans le nord du Chili (avec des teneurs jusqu'à 1,5-1,8 mg ClO_4^-/g)[94], en zone non saturée et dans les eaux souterraines dans l'ouest des Etats-Unis[95], ou encore dans les déserts de Namibie et ceux des Emirat Arabes Unis[96]. Les sources de ClO_4^- naturel sont susceptibles de générer des concentrations élevées dans leur environnement[97]. Par exemple, des concentrations élevées en ClO_4^- ont été mesurées dans les eaux superficielles (supérieures à 1 480 µg ClO_4^- .L^{-1}) dans le désert d'Atacama.

Hatzinger et al. (2022)[98] démontrent que les eaux d'irrigation peuvent mobiliser les accumulations naturelles indigènes de sels de ClO_4^- depuis la zone non saturée dans un secteur semi-aride du nord-est de l'état d'Oregon aux Etats-Unis, générant des concentrations supérieures à 34,7 µg ClO_4^- L^{-1} dans les eaux souterraines. La légende veut que des indigènes qui auraient allumé un feu sur les sols nitratés auraient été impressionnés par l'énergie inattendue de la combustion. Revenant le lendemain sur les lieux, ils constatèrent que certaines pierres entraient en combustion[99]. Des analyses isotopiques ont montré que les sels perchloratés se forment dans la haute atmosphère par oxydation du chlore volatil atmosphérique par l'ozone (O_3) et la formation de $HClO_4$ (acide perchlorique). Les sels retombent ensuite à la surface du sol où ils peuvent être entrainés par des pluies torrentielles vers des bassins et dépressions où ils s'accumulent et précipitent après évaporation.

---

[94] Urbansky, E. T., Brown, S. K., Magnuson, M. L., Kelty, C. A. (2001). *Perchlorate levels in samples of sodium nitrate fertilizer derived from Chilean caliche. Environmental Pollution,* 112: 299-302.

[95] Rajagopalan, S.; Anderson, T.A.; Fahlquist, L.; Rainwater, K.A.; Ridley, M.; Jackson, W.A. (2006). Widespread presence of naturally occurring perchlorate in hight plains of Texas and New Mexico. *Environ. Sci. Technol.* 40:3156-3162.

[96] Jackson W. A., Bohlke J. K., Andraski B. J., Fahlquist L., Bexfield L., Eckardt F. D., Gates J. B., Davila A. F., McKay C. P. and Rao B. (2015). Global patterns and environmental controls of perchlorate and nitrate co-occurrence in arid and semi-arid environments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 164, 502–522.

[97] Vega, M., Nerenberg, R., & Vargas, I. T. (2018). Perchlorate contamination in Chile: Legacy, challenges, and potential solutions. *Environmental research,* 164, 316-326. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.034.

[98] Hatzinger, P. B., Böhlke, J. K., Jackson, W. A., Gu, B., Mroczkowski, S. J., & Sturchio, N. C. (2022). Isotopic discrimination of natural and anthropogenic perchlorate sources in groundwater in a semi-arid region of northeastern Oregon (USA). *Applied Geochemistry,* 139, 105232.

[99] Caliche. The early years. https://www.sqm.com/sqmeninfografias/eng/caliche.html

Les formations rocheuses formant les dépôts chiliens, encore désignés par « salpêtres du Chili » (ou *Caliches*), sont principalement constituées de minéraux paléochimiques parmi lesquels prévalent, au sein d'une matrice minérale (argiles, sables et graviers), le nitrate de sodium ($NaNO_3$) (généralement 15% en masse, mais pouvant excéder les 50% pour les faciès les plus riches)[100], les sulfates et chlorures de sodium ($(Na)_2SO_4$, NaCl), potassium (KCl), calcium ($CaCl_2$) et magnésium ($MgCl_2$), avec en moindre mesure iodates (IO_3^-, jusqu'à 0,06% en masse), borates ($B(OH_4)^-$ jusqu'à 0,5% en masse) et perchlorates de potassium ($KClO_4$, jusqu'à 0,03% en masse)[101]. Le sélénium (séléniates SeO_4^{2-}), le lithium, élément actuellement à haute valeur ajoutée, sont également présents dans ces dépôts. La composition des eaux mères dans lesquelles étaient dissous les nitrates du Chili lors de leur raffinage donne un aperçu sur la composition moyenne des roches nitratées. Celle de l'usine chilienne Alianza de Tarapaca donna les concentrations suivantes (cf. Tableau 1 ci-dessous).

Composé	Concentration	Unité
Nitrate de sodium	393,20	g/L
Chlorure de sodium	93,33	g/L
Nitrate de potassium	173,1	g/L
Perchlorate de potassium	9,43	g/L
Sulfate de calcium	3,35	g/L
Sulfate de magnésium	42,41	g/L
Iodate de sodium	3,16	g/L
Oxydes de fer et argile	7,6	g/L

Tableau 1 : Composition d'eaux mères de raffinage de nitrates du Chili (1917)[102].

Les sels prédominants étaient les nitrates de sodium et de potassium (salpêtre) et le chlorure de sodium. Les teneurs en ces différents sels varient au sein de ces formations selon les faciès. Ceux nitratés d'intérêt économique forment des bancs de 20 cm à 5 m d'épaisseur[103].

Il n'existe aucune mention dans la littérature publiée et les archives consultées dans le cadre de cette recherche relative à l'occurrence dans ces formations de sels de chlorate naturels.

- **Chlorates et perchlorates synthétiques**

Les sels de chlorate et de perchlorate sont essentiellement d'origine synthétique. Le chlorate a longtemps été produit par un procédé chimique. En 1788, le chimiste français Berthollet découvrit le chlorate de potassium ($KClO_3$) en faisant lentement barboter du chlore gazeux (Cl_2) dans une solution concentrée et chaude de KOH selon la réaction.

$$3Cl_2 + 6KOH \rightarrow KClO_3 + 5KCl + 3H_2O$$

[100] R.A.F. Penrose, Jr. (1910). « *The nitrate deposits of Chile* ». *The Journal of Geology*. January-February, 1910.

[101] UC SAREP (University of California Sustainable Agriculture Research and Education Program) (2002). *Chilean Nitrate for General Use as an Adjuvant in Crop Production*. National Organic Standards Board Technical Advisory Panel Review, compiled for the USDA National Organic Program.

[102] Bibliothèque nationale de France. Matignon, C. (1917). « *L'industrie de l'iode, son histoire, son état actuel* ». *Revue des Sciences pures et appliquées*. Tome vingt-huitième. p.514.

[103] Ericksen, G. E. (1983). "*The Chilean Nitrate Deposits: The origin of the Chilean nitrate deposits, which contain a unique group of saline minerals, has provoked lively discussion for more than 100 years". American Scientist,* 71(4). 366–374. http://www.jstor.org/stable/27852136.

Les ions perchlorate furent ensuite produits par décomposition thermique des chlorates avant que ce procédé ne soit abandonné à la fin du XIXe siècle pour être remplacé par le procédé électrochimique, encore utilisé de nos jours. Les perchlorates de synthèse (majoritairement $NaClO_4$) furent dès lors produits par l'électrolyse de sels de chlorate ($NaClO_3$), eux même générés par l'électrolyse sous haute intensité électrique de saumures NaCl. L'électrosynthèse des perchlorates s'effectue encore aujourd'hui en deux temps, selon les équations suivantes :

$$NaCl + 3H_2O + 6\ Faradays \rightarrow NaClO_3 + 3H_2$$
$$NaClO_3 + H_2O + 2\ Faradays \rightarrow NaClO_4 + H_2$$

Usages actuels et anciens des chlorates, perchlorates

- **Introduction**

Afin d'identifier sources et origines des ions perchlorate présents actuellement dans les eaux souterraines, il convient de rechercher les usages actuels et/ou passés des sels (per)chloratés mais aussi ceux des nitrates du Chili renfermant des ions perchlorate en impuretés. A noter que le perchlorate de sodium industriel renferme du chlorate de sodium en impureté et vice versa. L'usage des chlorates peut donc aussi être un pourvoyeur en ions perchlorate vers l'environnement. L'identification des usages contemporains des composés chloratés et perchloratés est aussi nécessaire dans la recherche de la ou des origines des ions perchlorate marquant actuellement les eaux souterraines du quart nord-est de la France, afin de pouvoir distinguer les sources historiques anciennes, d'éventuels entrants plus récents.

- **Usages actuels**

Les sels de (per)chlorates emmagasinent l'énorme quantité d'énergie nécessaire à leur synthèse. Ils la libèrent dans leur décomposition initiée par un apport d'une énergie d'activation. Les chlorates et perchlorates possèdent des vitesses de détonation et des températures de décomposition très élevées (1 500-2000°C). Oxydants (comburants) stables et puissants, ces sels énergétiques sont actuellement principalement utilisés en pyrotechnie civile (signaux, torches et allumettes, charge de propulsion des airbags), l'aéronautique civile (les deux accélérateurs *booster* latéraux du lanceur Ariane 6 sont chargés par 2 x 250 tonnes d'un ergol solide constitué de NH_4ClO_4, d'aluminium métal Al° liés par un polymère), aéronautique militaire (ergols des missiles balistiques, tactiques et roquettes). Ces sels trouvent des applications en pyrotechnie civile dans les torches, feux de Bengale et autres feux d'artifice. Les températures de décomposition peuvent générer des flammes très lumineuses et des flashs colorés en présence de sels métalliques, alcalins et alcalino terreux. Les vitesses de détonation se traduisent aussi par un effet sonore. Les perchlorates constituent de 10 à 20% en poids des poudres des éléments de pyrotechnie civile (feux d'artifices), pour 1 à 2% pour les chlorates et 10% pour les nitrates[104].

Le perchlorate de lithium $LiClO_4$ est utilisé dans l'industrie chimique comme co-catalyseur dans la synthèse de carbonyle avec des aldéhydes, connue sous le nom de réactions Baylis-Hillman, mais aussi dans la fabrication de piles bouton (électrolyte inerte). Enfin le perchlorate de magnésium $Mg(ClO_4)_2$ est employé dans des batteries militaires. Ce sel est aussi utilisé comme déshydratant (sous forme de perchlorate de magnésium anhydre solide ou légèrement hydraté) pour recueillir et analyser les molécules d'eau formée lors de combustions.

[104] Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweiz, BUWAL, (2001). *Feuerwerkskörper - Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte.*

Les sels de perchlorate trouvent aussi des applications en médecine et dans de nombreuses activités industrielles et artisanales.

Les chlorates et perchlorates sont par ailleurs produits lors du vieillissement (diminution des concentrations en chlorures) de solutions d'hypochlorites de sodium (NaClO, ou Eau de Javel), substances mises en œuvre comme désinfectant des eaux destinées à la consommation humaine ou comme agent de blanchiment de la pâte à papier (le chlorate de potassium avec addition *d'acide* sulfurique concentré, donne du peroxyde de chlore ClOOCl).

L'usage de $NaClO_3$ comme herbicide non sélectif est prohibé en France depuis 2010. Il est à noter que le chlorate de sodium de formulation industrielle qui avait été utilisé comme herbicide renfermait en impureté du perchlorate de sodium. Des analyses effectuées sur du chlorate de sodium de formulation industrielle montrent des teneurs en perchlorates de 1,5 à 230 $mg.kg^{-1}$[105].

Les sels de chlorate et de perchlorate ne font pas l'objet d'un usage dans les explosifs actuellement en dotation dans les armées.

- **Usages anciens. Explosifs français explicitement chloratés et perchloratés de la Grande Guerre**

Découverte et mise au point des premiers explosifs (per)chloratés

En 1788, Berthollet, ébloui par les propriétés comburantes exceptionnelles du chlorate de potassium ($KClO_3$), eut l'idée de le substituer au salpêtre (KNO_3) dans la fabrication de la poudre noire (mélange de KNO_3 et de charbon de bois). Malheureusement, il obtint alors une poudre non plus déflagrante mais détonante, brisante. Un premier essai de fabrication grandeur nature à la poudrerie d'Essonne rasa son atelier. Les propriétés explosives des chlorates orientèrent rapidement ces sels vers des applications pyrotechniques civiles comme militaires.

Les premiers explosifs chloratés furent développés dès 1870 ; le premier fut breveté par Herman Sprengel en 1871 sous le nom d'*Explosif-Sprengel* correspondant à un mélange de chlorates, d'hydrocarbures pétroliers et/ou de nitrobenzène et/ou de CS_2. Il n'existe aucune indication d'usage d'explosifs explicitement (per)chloratés durant guerre franco-prussienne de 1870 (durant laquelle l'usage de la poudre noire prévalait dans l'Artillerie.

La France, l'Allemagne, la Suisse, la Suède et les Etats-Unis commencèrent la synthèse du perchlorate dès fin du XVIIIe siècle.

La première production commerciale de perchlorate date de 1890 par la *Stockholm Superfostfat Fabrisk ABC* à Masebo, en Suède. Les *Cheddites* furent parmi les premiers explosifs chloratés produits et utilisés à l'échelle industrielle avant la Première Guerre mondiale principalement pour des usages civils en mines et carrières. Elles étaient fabriquées au début du XXe siècle dans le village de Chedde (commune de Passy), dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie. Le village donna son nom à la grande famille des explosifs de type *Cheddite*.

[105] GeoSyntec (2005). *Draft Remedial Investigation Report*, Prepared for Goodrich Corporation. 2007. Goodrich Corporation progress report for the month of September, 2007, 160-acre Parcel, Rialto, California.

Procédés industriels de fabrication des explosifs (per)chlorates

La production électrolytique des sels de chlorate et de perchlorate de sodium à partit de saumures NaCl était réalisée dans des bacs « Corbin[106] ». Il s'agissait de simples bacs en béton armé dans lesquels étaient scellés deux « faisceaux » ou « appareils », sortes de peignes s'imbriquant l'un dans l'autre ; l'un en fer constituait la cathode, l'autre, en platine, formant l'anode. Le refroidissement était assuré par une circulation d'eau dans un serpentin en tube d'acier immergé dans le haut de la cellule.

Le perchlorate d'ammonium NH_4ClO_4 était ensuite obtenu par conversion chimique en faisant réagir le perchlorate de sodium $NaClO_4$ avec du sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$ (produit par des usines à gaz et des cokeries réalisant la distillation des charbons de houille) selon la réaction :

$$2\ NaClO_4 + (NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2\ NH_4ClO_4 + Na_2SO_4.$$

2 kg de chlorate de sodium ($NaClO_3$) donnaient ainsi 1 kg de perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4).

La fabrication de $KClO_3$ s'effectuait directement par voie électrochimique par électrolyse de solutions de potasse (KCl) ou par voie chimique, à partir d'une solution contenant $NaClO_3$ et NaCl. L'ajout à une température voisine de 75 °C de chlorure de potassium KCl solide entraînait après refroidissement de quelques heures, par double décomposition, la précipitation du chlorate de potassium, peu soluble, selon la réaction :

$$NaClO_3 + KCl \rightarrow KClO_3 + NaCl$$

Les explosifs (per)chloratés étaient constitués à base de sels (Na^+, K^+, NH_4^+) de chlorate (ClO_3^-) et de perchlorate (ClO_4^-) (le comburant, l'oxydant) et d'hydrocarbures (le carburant) comme des cires, paraffines et vaselines. Ces mélanges étaient confectionnés dans de grands chaudrons dans lesquels on faisait fondre les cires ; les sels étaient progressivement versés dans le bain qui était continuellement brassé. Du Bleu de Méthylène[107] était ajouté pour contrôler la parfaite homogénéité du mélange de sels et des cires. Ce colorant teintait les explosifs (per)chloratés d'une couleur bleu-gris caractéristique (cf. Figure 17).

[106] Du nom de Paul Corbin, industriel, associé dans la création au début du XXe siècle de la Société des Forces Motrices et Usines de l'Arve exploitant de l'usine de Chedde / Passy et ingénieur-chimiste à l'origine des procédés de fabrication des chlorates et perchlorate par électrochimie. En 1916, le groupe de Paul Corbin fusionne avec sa principale concurrente : la Péchiney-Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue.

[107] Ou « oléate de bleu », du bleu d'aniline dissout dans de l'huile. Service Historique de la Défense, site de Vincennes, GR 5 N 266-03. Maurin, Lieutenant-Colonel (1915) Ministère de la Guerre. Notions succinctes sur les explosifs employés aux usages de la guerre. p. 19.

Sites de production des sels de chlorate, de perchlorate et d'explosifs (per)chloratés destinés à l'armée française durant la Première Guerre mondiale

Durant la Première Guerre mondiale, les sels chloratés et perchloratés furent essentiellement produits en France sur le site de Chedde. L'usine électrochimique exploitée par la Société de l'Arve et des Explosifs (SARV) fut placée sous contrôle de l'armée qui installa à ses abords une poudrerie où étaient confectionnées les différentes formulations d'explosifs (per)chloratés. Les chlorates furent aussi synthétisés à Saint-Jean-de Maurienne[108] (département de la Savoie), à Auzat[109] (département de l'Ariège), à Argentière[110] (département des Hautes-Alpes). La SARV développa aussi ses filiales à Epierre (département de la Savoie) et à Borgo Franco (Italie). En août 1915, avec le programme de production des explosifs, trois nouvelles installations furent créées, à Beyrède (département des Hautes-Pyrénées) par l'Union Financière des Forces Hydrauliques dans l'ancienne usine d'aluminium du Sud-Ouest, à Barcelone (Espagne) par la Compagnie Catalana Productos Chimicos et à Nera-Montoro, près de Terni, au pied des Abruzzes, en Italie, par la société Borgo Franco.

Les explosifs chloratés et perchloratés furent fabriqués dans des poudreries d'Etat à Chedde, Castres (département du Tarn), Vonges (département de la Côte-d'Or) et dans d'autres sites de production de moindre importance.

Les formulations et les usages des explosifs (per)chloratés durant la Grande Guerre. Une spécificité française

La production de sels de chlorate et de perchlorate, et plus généralement d'explosifs (per)chloratés, fut réellement stimulée (i) par les impératifs tactiques et opératifs dictés par les circonstances de la guerre de position installée dès l'hiver 1914-1915, et l'usage d'un nouvel armement spécifique aux combats rapprochés des tranchées (ii) par la recherche de supplétifs aux explosifs règlementaires standards nitrés de l'artillerie conventionnelle, comme la *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol), du fait de la surconsommation inattendue, non anticipée, de munitions et donc en corollaire celle des poudres et explosifs lors des premiers mois de la guerre. Ses origines sont à lire au travers du prisme de la crise des munitions de 1914 et des tensions dans l'approvisionnement en explosifs entre les trois armes engagées au front, l'Artillerie (de campagne, lourde), l'Infanterie (et son artillerie de tranchée, ses grenades) et le Génie (et ses charges de destruction). L'Artillerie traditionnelle devait en effet dès lors partager les explosifs avec de nouvelles formes d'artillerie, pour de nouvelles tactiques militaires, inattendues elles aussi, celles de la guerre de siège.

Les grenades et autres projectiles d'artillerie de tranchée, les fourneaux de destruction, constituaient un armement indispensable aux combats rapprochés des troupes engagées au contact du front dans la guerre de position. Mais une réalité s'imposa rapidement « *Dès le début de la guerre, les besoins de l'artillerie en explosifs n'ont laissé disponibles, pour les autres Services de l'Armée, que ceux à base de chlorates*[111] ».

---

[108] Compagnie Alais et Camargue.

[109] *Ibid.*

[110] Société Electrométallurgique Française (SEMF de Froges).

[111] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, GR 9 NN 4 409 – 10. Note au sujet des explosifs chloratés et perchloratés. Daté (manuscrit) : 6 juillet 1915.

Mais les conditions d'utilisation et les exigences de sécurité des explosifs des artilleries de tranchées et de campagne différaient significativement. Les explosifs (per)chlorates ne pouvaient charger les projectiles d'artillerie de campagne et lourde car bien trop sensibles aux chocs et à la friction, des propriétés incompatibles avec les violentes sollicitations mécaniques imposées au chargement lors du tir, lors du coup de départ dans le canon.

Les explosifs nitrés très stables, mais coûteux et énergivores à produire, dans un climat de risques de pénuries de matières premières hydrocarbonées, devaient impérativement être réservés pour les usages exigeants de l'artillerie classique. Par contre, les chargements explosifs des projectiles d'artillerie de tranchée et des grenades étaient bien moins sollicités lors des jets et tirs du fait des faibles vitesses des coups de départ, comme on peut clairement le voir sur la Figure 16 ci-contre.

Figure 16 : Tirs d'épreuve de Minenwerfer lourds allemands. L'impression des projectiles, clairement visible, sur le support photographique est rendu possible par les faibles vitesses du coup de départ[112].

Les vitesses des projectiles au coup de départ étaient de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres par seconde pour plusieurs centaines pour les engins de l'artillerie de campagne. Les explosifs (per)chlorates étaient compatibles avec leurs usages dans l'artillerie de tranchée.

Le recours massif et systématique aux explosifs (per)chlorates tout au long de la Grande Guerre fut une spécificité propre à l'armée française dont l'origine est à rechercher, non seulement dans le changement radical de la physionomie de la guerre, le passage de la guerre traditionnelle de mouvement à celle inattendue, de siège et de position, mais aussi dans la singularité géographique et géologique du territoire métropolitain. Son sous-sol était pauvre en ressources hydrocarbonées, pétrole et hydrocarbures, mais aussi, dès l'automne 1914 en charbon suite à la perte d'une grande partie de ses ressources après l'invasion allemande du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais.

De la houille étaient extraits le benzène, le toluène nécessaire à la production d'explosifs nitrés nitroaromatiques réglementaires comme le TNT (ou *Tolite*) et la *Mélinite*. La France importa ces hydrocarbures de Bornéo (Indonésie) alors sous contrôle d'un pays neutre (Pays-Bas). La production et l'usage d'explosifs (per)chlorates ne s'imposa ni en Grande-Bretagne, ni en Allemagne, dont les sous-sols regorgeaient de houille et autres lignites, qui suffisaient à alimenter la carbochimie puis la chimie de synthèse pour produire à grande échelle des poudres et explosifs standards et traditionnels. Ces productions allemandes et britanniques pouvaient subvenir aux besoins de toutes les armes engagées au front. Des formulations d'explosifs perchlorates furent produites et employées par les Allemands et les Britanniques, mais à bien moindre échelle que du côté français, principalement pour leurs propriétés de très grande puissance et brisance.

Les façades littorales et le sous-sol (Lorraine, etc.) de la France étaient quant à elles riches en sel de mer et en sel gemme, renfermant du chlore (NaCl) et ses reliefs des Alpes et des Pyrénées, situés loin des zones menacées par le conflit, constituèrent des châteaux d'eau et des sources inépuisables d'énergie hydroélectrique (barrages, chutes d'eau et conduites forcées) renouvelables.

[112] Collection particulière, Amis du Hartmannswillerkopf.

L'électrochimie (du chlore), l'électrométallurgie (des métaux non ferreux, de l'aluminium, du magnésium, etc.) développée dès le XIXe siècle dans les vallées alpines et pyrénéennes formèrent dès l'entrée en guerre un des fers de lance de l'industrie française. L'électrochimie et l'électrométallurgie des massifs montagneux furent mobilisées pour les productions de guerre et celle d'explosifs, délaissant un temps celles de l'aluminium, de magnésium et magnésie, au profit de l'électrosynthèse (i) de composés énergétiques basés sur les chlorates et perchlorates, puis dès 1915, (ii) de chlore gazeux Cl_2 pour la production des agents agressifs pour la guerre chimique. La production d'aluminium connut ensuite un regain d'intérêt avec l'affirmation de l'aviation comme arme à part entière dans la guerre.

L'approvisionnement de l'artillerie de tranchée française et du génie en explosifs (per)chloratés fut une solution industrielle à la poursuite de la guerre sous la menace de la pénurie en matières premières hydrocarbonées accessibles au droit du territoire national non occupé, en respectant un cahier des charges bien précis permettant de répondre aux besoins des armées en campagne, et pour l'industrie, en tirant partie des spécificités du territoire. Ces explosifs pouvaient aussi être produits en masse à bas coûts et assurer l'approvisionnement de l'Infanterie et du Génie en explosifs tout en réservant les explosifs nitrés, stables et puissants, coûteux, aux usages exigeants de l'artillerie de campagne et de l'artillerie lourde. L'industrie des explosifs chercha durant la guerre et ses usines à optimiser toujours plus avant la production des explosifs (per)chloratés en terme de coûts et de temps, tout en conservant la même efficacité explosive.

L'armée se tourna dans un premier temps pour doter l'artillerie de tranchée vers des explosifs civils employés avant-guerre dans les mines et carrières et étudia l'usage possible de la *Cheddite* qui était un mélange d'hydrocarbures très courants (cires, vaseline, paraffines, etc.) avec du chlorate de potassium $KClO_3$ mais aussi jusqu'à 15% de dinitrotoluène et 1% dinitronaphtalène, des NAC, nitrés. « *L'huile, la vaseline, la paraffine servent à enrober le chlorate et à la mettre à l'abri de l'humidité et du frottement*[113] ». Mais « *Afin de ne pas diminuer les ressources en explosifs nitrés mis à la disposition de l'Artillerie* [114]» pour charger les projectiles explosifs de l'artillerie de campagne, l'armée dut renoncer à cet emploi et le Service des Poudres fut contraint de substituer la *Cheddite* par un autre explosif chloraté dont la production devint rapidement croissante : il s'agissait de l'explosif alors désigné par l'acronyme *O N°6.B* formé (en 1915) de 90 % de $KClO_3$ (chlorate de potassium), 7 % de paraffine et 3 % de vaseline mis à disposition de l'arme du Génie pour ses services propres (pour les fourneaux de mines et de destruction). Rapidement, cette formulation chloratée s'étendit au chargement de divers projectiles utilisés dans la guerre de tranchées et dans la guerre aérienne « *bombes d'aéroplanes, bombes Assen, grenades à main, raquette, pétards et engins similaires, projectiles de mortiers de 150 mm […] et des mortiers Cellerier de 77 mm […].* [115]». Mais la rupture des liens commerciaux avec l'Allemagne priva la France de ses principaux approvisionnements en potasse (KCl) importés avant-guerre depuis les gisements d'Alsace et de Stassfurt. La production des explosifs O N°6 B s'en trouva donc affectée, car bridée par des réserves en potassium très limitées. L'industrie chercha aussi les meilleurs rendements en privilégiant les productions pour lesquelles, sur le plan qualitatif, la consommation énergétique était la plus réduite par unité de masse d'explosifs générée, ouvrant ainsi des possibilités d'accroissement quantitatif de ces productions.

---

[113] Bibliothèque nationale de France. Henry De Varigny (1916). « *Explosions et explosifs* ». *Pages d'histoire. 1914-1916*. Souscription du Ministère de l'Instruction publique et du Gouvernement belge. 11e série. Librairie Militaire Berger-Levrault. p. 51.

[114] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 409-10. Note au sujet des explosifs chloratés et perchloratés. Daté (manuscrit) : 6 juillet 1915. p.1.

[115] *Ibid.,* p.2.

Un autre explosif, cette fois-ci perchloraté, vit le jour, nommé *Ch 86/14***,** constitué de 86% de perchlorate d'ammonium et 14% de paraffine initialement destinés pour charger des obus explosifs de l'artillerie de campagne (obus de 75 mm). Ce projet fut rapidement abandonné du fait de la faible fiabilité du chargement au moment du tir, se traduisant par des accidents et incidents de tir dès janvier 1915. Cet explosif avait été accaparé jusque-là presqu'exclusivement pour le chargement des bombes à ailettes du canon de tranchée Doumène-Dumezil et en moindre mesure pour certaines bombes d'aviation du début de guerre. Avec le développement de la guerre de position à l'hiver 1914-1915, la consommation de ces deux explosifs s'accrut de façon extraordinaire, passant d'une demande quotidienne de 15 tonnes pour l'*O N°6 B* et 40 tonnes pour le *Ch 86/14* avant avril 1915 à respectivement 40 et 70 tonnes en juillet 1915.

Mais « *Ces chiffres soulèvent deux questions : celle des ressources en matières premières, et celle de la force motrice utilisée à leur élaboration* [116]».

La première solution destinée à limiter la consommation d'explosifs (per)chlorates, et en corollaire celle de l'énergie et des matières premières, fut identifiée par l'Armée (6e Direction). Des réserves de *Dynamite n°1 (Dynamite – gomme),* l'explosif standard règlementaire du Génie avant l'introduction de la *Mélinite*, étaient disponibles. Il s'agissait aussi par ailleurs d'un explosif « *qu'on pourrait se procurer en certaine quantité à l'étranger* [117]». Il fut demandé au Génie de réserver les explosifs chlorates pour le chargement des projectiles d'artillerie de tranchée et d'employer, pour la confection des fourneaux de mines de destruction et camouflets de la guerre souterraine (cf. Section 3h du présent manuscrit), la *Dynamite n°1* dont les performances en terrains meubles équivalaient à celles des fourneaux chlorates.

La seconde solution fut à l'initiative d'une entreprise privée : la Société des Forces Motrices de l'Arve (SARV) (à Chedde) qui proposa deux nouvelles formulations d'explosifs (per)chlorates. La première, désignée par *Explosif P* était un mélange de 61,5% de perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4), 30% de nitrate de sodium ($NaNO_3$) et 8,5% de paraffine. Il s'agissait en quelque sorte d'un explosif *Ch 86 / 14* « coupé » par le nitrate de sodium dont l'ajout limitait, à puissance de détonation équivalente, l'apport en perchlorate d'ammonium coûteux et énergivore. Les archives consultées dans le cadre de la présente recherche n'apportent aucune indication, ni sur la nature ni sur l'origine du nitrate de sodium utilisé, s'il s'agissait de nitrate du Chili, brut ou raffiné, ou de nitrate de sodium d'une autre origine, synthétique ou naturelle. Sur le plan industriel « *pour une tonne de perchlorate d'ammoniaque , on obtiendrait 1 639 k d'Explosif P, au lieu de 1 162 k, d'explosif 86 / 14* [118]». L'*Explosif P* présentaient aussi indéniablement d'autres avantages eu égard au *Ch 86 / 14*. Sa fabrication était facilitée par la suppression d'étapes de tamisage – refroidissement répétées compte tenu de l'absence d'excès de paraffine. Par ailleurs, au-delà d'être très peu sensible aux chocs et à la friction, l'*Explosif P* était difficilement inflammable[119].

---

[116] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 409-10. Note au sujet des explosifs chlorates et perchlorates, *op. cit*.p.2.

[117] *Ibid.,* p. 3.

[118] *Ibid.,* p. 4.

[119] *Ibid*.

L'*Explosif S* était chloraté, de formulation 90 % de chlorate de sodium, 7 % de paraffine et 3 % de vaseline. Le développement puis la mise en service de cet explosif furent en partie motivés par des coûts de production moindre par rapport aux explosifs perchloratés mais l'*Explosif S* présentait toutefois un inconvénient par rapport aux explosifs à base de perchlorate ou de chlorate de potassium : il était très hygromorphe ce qui exigeait pour sa conservation des conditions particulièrement contraignantes d'entreposage.

L'*Explosif 90/10* (90% de perchlorate d'ammonium et 10% de paraffine) et l'*Explosif E* (92% de perchlorate d'ammonium et 8% de paraffine) étaient, selon Corbin (1915)[120], réservés pour « *des cas particuliers* » sans que les archives consultées en question ne précisent quels ils furent. Maurin (1915)[121] apporte la précision suivante au sujet de l'*Explosif 90 / 10* « *On a également utilisé pour l'aviation le 90 / 10, plus sensible à la détonation* [122]».

En résumé, les formulations utilisées par l'artillerie de tranchée française durant la Première Guerre mondiale étaient au nombre de six, dont quatre usuellement utilisées. Il s'agissait selon Corbin (1915)[123], et Maurin (1915)[124] de:

- L'*Explosif Ch 86 / 14* (perchloraté) était employé pour le chargement des bombes de mortier 58T, dont le « Crapouillot », renfermant de 5 à 22 kilogrammes d'explosifs selon les calibres ;

- L'*Explosif P* (perchloraté) chargea des bombes de mortier 58T et 150T, renfermant 5 à 22 kilogrammes d'explosifs ; la Figure 17 donne un aperçu photographique de l'aspect d'un explosif perchloraté (Explosif P ou Ch 86 / 14) chargeant un projectile de tranchée français à ailettes 58T type DLS ;

- L'*Explosif S* (chloraté) était utilisé pour le chargement des bombes lourdes, de 240 millimètres et 340 millimètres, embarquant de 45 à 93 kilogrammes d'explosifs selon les calibres;

- Dans l'armée française, le Génie utilisa pour sa part, pour ses mines de sapes, ses grenades, ses pétards, les bombes de tranchées et d'avion l'explosif (chloraté) dit *O N°6. B.*

[120] Corbin, M.P., (1915). *Conférence sur les explosifs chloratés et perchloratés au centre d'instruction de la pyrotechnie à Bourges à MM. Les Officiers bombardiers. 1er juillet 1915*, *op. cit*. p.4.

[121] Maurin, Lieutenant Colonel (1915). *Notions succintes sur les explosifs employés aux usages de la guerre, op. cit.* p.4.

[122] *Ibid*, p.19.

[123] *Ibid.*

[124] *Ibid.*

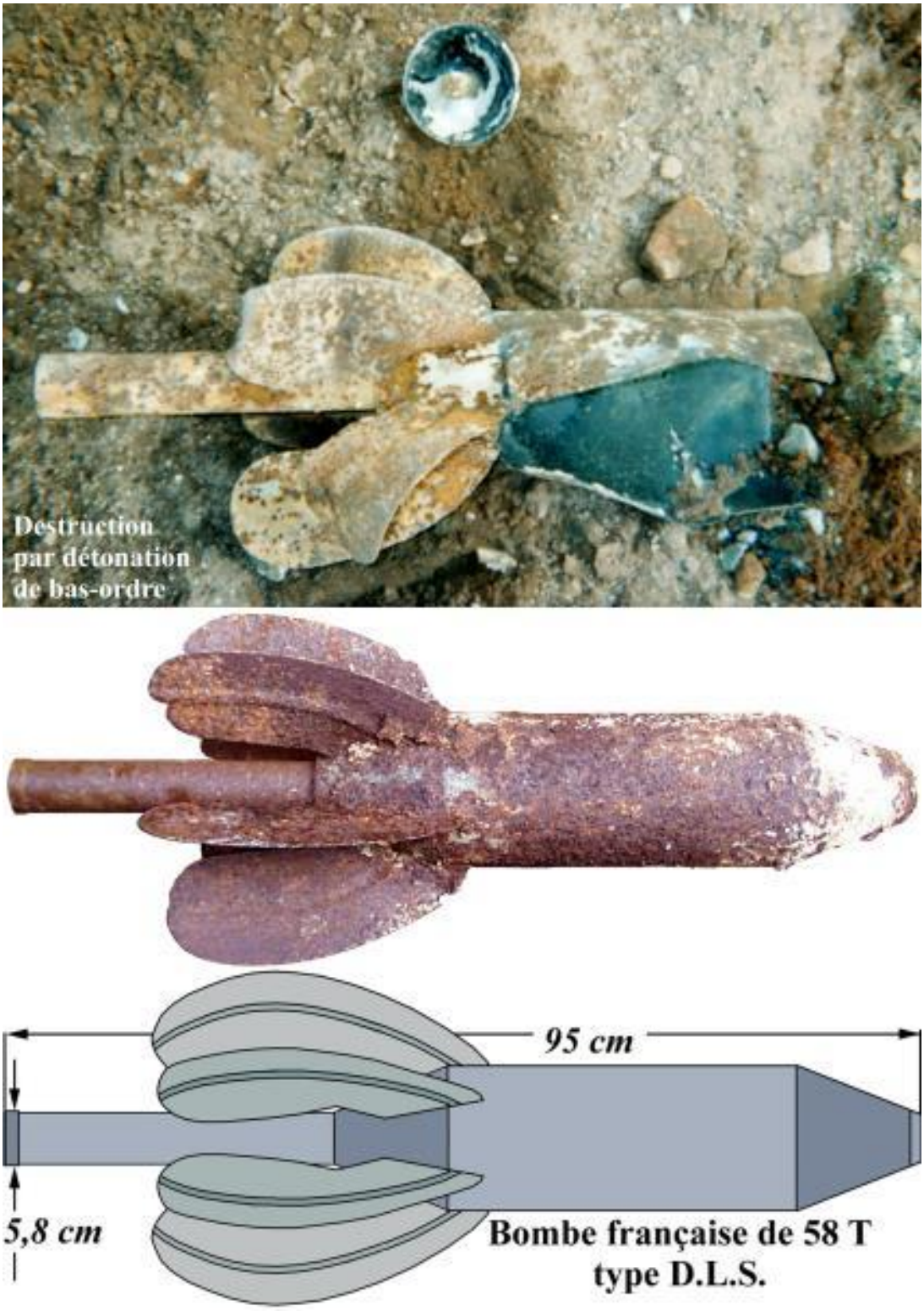


Figure 17 : Projectile français empenné à ailettes de 58 T type DLS découvert puis volontairement « déflagré » (détonation de bas-ordre) par les professionnels du déminage montrant son chargement interne gris-bleuté d'explosif perchloraté[125].

[125]Collection particulière, Belot, H. Communication personnelle. Non publié. On notera aussi la finesse des parois de cet engin d'artillerie de tranchée.

- **Usages anciens. Explosifs explicitement chloratés et perchloratés allemands et britanniques**

Côté britannique

Les Britanniques firent le choix de réserver leur sel et leur puissance électrique pour la production de chlore et de gaz de combat au détriment des chlorates et perchlorates, disposant par ailleurs de tout le TNT nécessaire pour charger leurs engins explosifs d'artillerie de tranchée. Cette puissance électrique était aussi indispensable pour la production d'aluminium métal dont les Britanniques usèrent pour la confection des explosifs inorganiques de leurs fourneaux de guerre de mines (*Ammonal*, nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) + Al°). Certains *Ammonals* étaient explicitement perchloratés, comme ceux chargeant les projectiles de mortier *Stokes*[126] de calibre 3 *inch*. La composition était la suivante : 41% de perchlorate de potassium ($KClO_4$), 27% nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), 18% d'aluminium métal (Al°) et 14% de 2,4,6-trinitrotoluène (TNT)[127]. Il s'agit donc d'une formulation d'un explosif à la fois perchloraté mais aussi nitré et nitraté. Aucune mention à l'usage d'explosifs chloratés n'a été identifiée.

Côté allemand

Les sels de perchlorate furent utilisés dans la formulation d'explosifs pour le chargement de certaines bombes de tranchées notamment, comme la *Perchloratite* qui était un mélange ternaire de 56 % de perchlorate de potassium ($KClO_4$), 32 % de dinitrobenzène, et 12 % dinitronaphthalène. Elle chargeait par exemple la *mittlere Sprengmine 13 (Perchloratmine)*[128] ou encore les *Flügelminen* lourdes de 94 à 98 kg[129]. L'autre explosif allemand perchloraté était la *Perdite* constituée de 72 % de nitrate d'ammonium, 10 % de perchlorate de potassium, 3 % de sciure de bois, et 15 % de di- et tri-nitrotoluène[130], utilisée pour le chargement d'engins d'artillerie de tranchée et pour la confection de fourneau de la guerre de mines (cf. Figure 18). En septembre 1918, deux formulations de *Perdite* auraient été utilisées:

- La première dérivait de la composition de la *Donarite* avec 9 ,7% de TNT (2,4,6-trinitrotoluène ou *Tolite* (cf. Figure 20), 75,7% de nitrate d'ammonium, 10,6% de perchlorate de potassium et 4% de sciure de bois ;

- La seconde dérivait de la composition de la *Westfalite* avec 14,5% de dinitrotoluène (DNT, cf. Figure 20), 68% de nitrate d'ammonium, 14% de perchlorate de potassium et 3,5% de sciure de bois.

Il s'agit en quelque sorte dans les deux cas d'une *Donarite* et d'une *Westfalite* (explosifs nitrés nitratés ternaires de sécurité) « boostée » par du $KClO_4$. Enfin, les Français ont relevé dans certaines bombes de tranchées (*Minen*) de 170 mm la présence d'un chargement par un explosif perchloraté à forte teneur (47% de dinitrobenzène et 53% de perchlorate de potassium).

---

[126] Du nom de son développeur, le britannique Frederick Wilfred Scott Stokes.

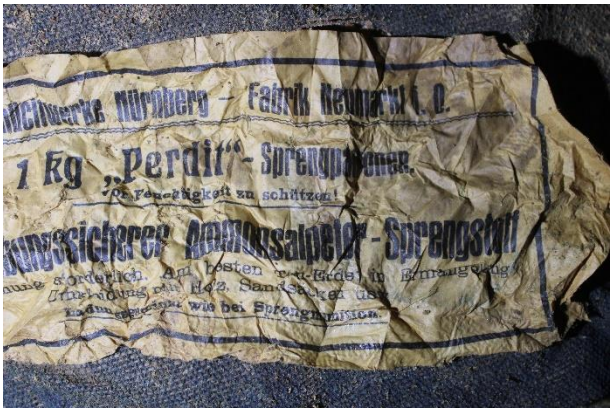
[127] Reibert, T. (2013). *Die Entwicklung des Granatwerfers im Ersten Weltkrieg*, *op. cit*. p. 193.

[128] Preuß, J., Eitelberg, F., Albrecht, G., Mauder, S., Dehner, U., Laskowsi, S. (2001). *Modellhafte Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und -vernichtung nach dem Ersten Weltkrieg*, op cit. p.34.

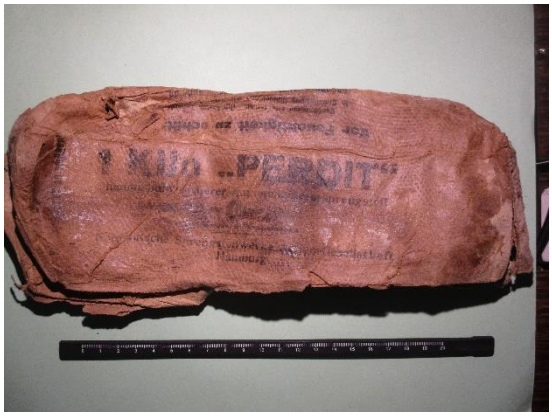
[129] *Ibid*, p.36.

[130] IABG (1999). *Untersuchung der Rüstungsaltlastverdachtsstandortein BayernVertiefte historische Erkundung der Einzelstandorte*. Arbeitshilfe Nutzungsspezifische Kontaminationsspektren. https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/kontaminationsspektren1.pdf

La Figure 18 ci-dessous donne un aperçu photographique de pains de *Perdite* de 1 kg, emballés dans du papier paraffiné portant inscription de leur provenance.



Papier paraffiné enveloppant un pain de 1 kg de Perdite provenant de la Cahülcitwerke Nürnberg-Fabrik Neumarkt i.o.



Pain de 1 kg de Perdite emballé dans un papier paraffiné portant l'inscription de sa provenance (Norddeutsche Sprengstoffwerke Aktien Gesellschafft, Hamburg)

Figure 18 : Perdite et papier d'emballage de pains de Perdite de 1 kg découverts dans un système A3 de galeries profonde allemande, La Haute Chevauchée, Argonne est (département de la Meuse). octobre 2021[131].

Ces formulations d'explosif apparurent vers la fin de la guerre. Il s'agissait d'explosifs de secours pour compenser chez les Allemands les carences croissantes en explosifs nitrés et nitratés.

A noter que les chlorates (ClO_3^-) furent incorporés dans des charges explosives primaires formant les détonateurs de certaines munitions allemandes. Les fusées percutantes allemandes étaient ainsi dotées d'une amorce composée de 30 % de fulminate de mercure ($Hg(CNO)_2$), 50 % de chlorate de potassium ($KClO_3$) et de 20 % sulfure d'antimoine (SbS)[132]. L'obus allemand d'artillerie de campagne de 77 mm de semi rupture était équipé d'une fusée possédant une gaine détonateur chargée d'acide picrique (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite* dénommée G*rf88, Granatfüllung 88* chez les Allemands, cf. Figure 20) ou encore de fulminate de mercure pur, de fulminate mélangé à du chlorate de potassium, ou de « charges mixtes » constituées de TNT ou de *Tétryl* (tétranitrométhylaniline) recouverts d'une couche de fulminate de mercure ou d'azoture de plomb[133]. Il n'existe aucune indication dans les archives consultées de l'usage de sels de chlorate dans des chargements des munitions et autres charges explosives principales autres que celle se référant aux explosifs primaires des amorces et détonateurs.

Pour de plus amples informations concernant la grande diversité des explosifs allemands de la Grande Guerre, le lecteur peut se référer au dictionnaire des mélanges explosifs allemands de R. Haas[134] (1996).

---

[131] Hubé, D. (2021).

[132]. *Artillerie allemande*. *Les fusées*, *op. cit*. p.43.

[133] *Ibid.,* p. 86.

[134] Haas, R, Thieme, J. (1996). *Lexikon der deutschen Explosivstoffmischungen*. Extrait de *Bestandsaufnahme von Rüstungsaltlastverdachtsstandorten in der Bundesrepublik Deutschland. Band 2: Explosivstofflexikon*. 2. erweiterte Auflage, 378 S. UBA-Texte 26/96; Umweltbundesamt, Berlin 1996.

Perchlorate dissimulé dans l'ombre de l'azote.

- **Introduction et problématique posée**

Nous venons de voir que les sels de chlorate et de perchlorate ont été sciemment produits, et utilisés pour charger les munitions et charges explosives, amorces et détonateurs des projectiles de la Grande Guerre par toutes les parties belligérantes et en premier chef les Français. Ces sels étaient issus de l'industrie électrochimique.

A l'exception des chlorates et perchlorates toute la chimie des matières énergétiques, qu'elle soit organique ou inorganique, était et reste encore basée sur celle de l'azote. Mais la chimie des poudres et explosifs est tributaire de l'approvisionnement en azote (N) dit combiné (à l'oxygène O), c'est-à-dire en nitrate (NO_3^-). Les nitrates sont des source d'azote assimilable par les plantes pour leur croissance. Ils entrent dans la composition des engrais azotés. Les nitrates sont aussi la source d'azote pour toute la filière industrielle de l'acide nitrique (HNO_3) et ses applications, notamment celles de la synthèse des poudres et explosifs. Avant et pendant la Première Guerre mondiale, l'azote combiné (sous forme de nitrates) provenait de trois origines différentes :

1. Après le tarissement des gisements de guano, de l'importation des nitrates du Chili et en moindre mesure des nitrates de potassium (comme le salpêtre d'Inde) (nitrates naturels) ;

2. Des procédés d'oxydation catalysée des effluents ammoniaqués (sulfate d'ammonium et ammoniac gazeux) issus de la condensation des gaz de la pyrolyse du charbon dans les cokeries et autres usines à gaz ;

3. De divers procédés de fixation de l'azote atmosphérique sous forme d'ammoniac synthétique (dont le procédé cyanamide, le procédé Birkeland Eyde, etc.) (nitrates synthétiques).

Localement et plus artisanalement, les nitrates étaient extraits de la matière organique, en particulier de certaines algues (kelp) et déchets de poisson.

Les nitrates extraits des gisements des salars des altiplanos du Chili restèrent, et de loin, jusque dans les années 20, la principale source d'azote directement exploitable sous forme d'azote combiné (sans à avoir à passer par des procédés d'oxydation de l'ammonium et de l'ammoniac en nitrates). En France, durant la Grande Guerre, ces nitrates représentaient plus de la moitié des apports en azote "*les nitrates du Chili nous arrivant à raison de 40 000 tonnes par mois, nitrates d'ammoniaque, nous arrivant de Norvège ou d'Amérique du Nord, à raison de 5 000 tonnes par mois, - les uns et les autres par des frets de plus en plus aléatoires et de plus en plus onéreux*[135]".

Or, comme cela a été présentés dans ce qui précède, les ions perchlorate étaient intimement liés à l'azote dans la principale source d'azote qui abreuva au XIXe et au début du XXe siècle l'Europe comme l'Amérique du nord (i) en engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière, (ii) mais aussi toute les filières industrielles dérivant de la production puis de l'usage de l'acide nitrique, qu'il s'agisse des verreries, des engrais, et surtout, en temps de guerre, des poudres et explosifs. Les nitrates du Chili.

[135] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Sénat. Rapport fait à la commission de l'armée sur le fonctionnement des poudreries du Finistère (Moulin Blanc et Pont de Buis) par M. Boudenot (Adopté le 3 août 1916). p. 10.

Ces minerais azotés extraits du sous-sol de l'Atacama, importés outre-Atlantique, étaient riches non seulement en azote mais aussi en sels de perchlorate, naturels. Les nitrates du Chili étaient importés sous deux états (i) des nitrates bruts et (ii) des nitrates raffinés. Des raffineries de nitrates existaient en France (comme à Lille, Marseille, etc.) pour purifier le minerai et accroître sa teneur en NO_3^- avant de le diriger vers les filières industrielles et agricoles. Il est vraisemblable que ces étapes de raffinage aient modifié les teneurs en ions perchlorate dans les nitrates livrés à l'industrie. Le raffinage procédait par dissolution du minerai brut dans des chaudrons d'eau chaude portée à 88°C durant 12 heures[136]. Le refroidissement de la solution saturée de sels solubles du minerai provoquait la précipitation et la décantation des sels moins solubles que le $NaNO_3$ (921 g/L à 25°C), et notamment le $KClO_4$ (15 g/L à 25°C). Les insolubles et sels décantés étaient retirés des bains alors que la solution résiduelle s'enrichissait en $NaNO_3$ mises ensuite à cristalliser. Les nitrates raffinés devaient donc être appauvris en perchlorate comparativement aux minerais bruts.

Il me paraît donc incontournable dans le cadre de cette recherche, pour tenter de répondre aux questions des sources et origines des perchlorates impactant actuellement les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France, d'étendre ma recherche historique, au-delà de l'identification des usages explicites de matières perchloratées durant la Grande Guerre, par l'identification des usages des nitrates du Chili à des fins militaires comme agricoles.

Cette recherche de l'occurrence des ions perchloratés chiliens dans les poudres et explosifs de la Grande Guerre se fonde sur l'analyse historique, sur archives, des différentes chaînes de production depuis le minerai brut de nitrate du Chili jusqu'aux produits fini, c'est-à-dire d'une part les matières énergétiques nitratées inorganiques et d'autres part celles nitrées et organiques. On distinguera les cas où ces occurrences étaient avérées de ceux où elle peut être pressentie.

- **Usages agricoles des nitrates du Chili**

Les nitrates du Chili ont été très massivement importés aux Etats-Unis et en Europe comme engrais pour soutenir l'agriculture intensive du blé et de la betterave, en particulier durant la première moitié du XXe siècle[137] contribuant à accroître significativement les rendements à l'hectare comme le souligna Zimmermann (1917) « *l'augmentation de valeur des récoltes due au nitrate a certainement dépassé un milliard de francs par an*[138] ». Le Chili exporta vers la France des nitrates entre 1873 et 1935, d'abord comme engrais azotés (suite à l'appauvrissement des réserves en guano). C'est ainsi que l'occurrence au sein des nitrates d'une substance inconnue aux effets phytotoxiques à partir de certaines doses (tonnes à l'hectare épandues), présente spécifiquement dans les nitrates chiliens, fut découverte à la toute fin du XIXe siècle : le perchlorate. Les teneurs en perchlorate mesurées par Zaharia (1898) dans des lots d'engrais nitratés chiliens oscillaient alors entre 2 et 7 %[139]. Les importations débutèrent en France vers 1830, mais l'usage des nitrates du Chili concernait surtout la période s'étendant de 1880 à 1950.

---

[136] Bibliothèque nationale de France. Wagner et L. Gautier (1878). *Nouveau traité de chimie industrielle à l'usage des chimistes*. Deuxième édition française. 1878.

[137] Dasgupta, P. K., Dyke, J. V., Kirk, A. B., & Jackson, W. A. (2006). *Perchlorate in the United States. Analysis of relative source contributions to the food chain. Environmental science & technology, 40(21).* 6608-6614.

[138] Bibliothèque nationale de France. Maurice Zimmermann. *Annales de géographie,* année 1917, volume 26, numéro 141, p. 237-238.

[139] Bibliothèque nationale de France. *Journal d'agriculture pratique, de jardinage et d'économie domestique. Nocuité du nitrate perchloraté*. 04/01/1900 – 28/06/1900. pp. 468 – 470.

Les importations augmentèrent significativement entre 1878 et 1908 (80 000 tonnes /an), puis se stabilisèrent aux alentours de 300 000 tonnes / an[140]. Après la guerre du Pacifique (encore désignée par « guerre du salpêtre » ou « guerre du nitrate ») qui opposa le Chili (soutenu par l'Allemagne) au Pérou et à la Bolivie (soutenus par la France) entre 1879 et 1884, et le succès chilien, l'Allemagne devint le principal importateur européen de nitrates du Chili. Ces importations déclinèrent dès l'entre-deux-guerres du fait de l'intensification de la production des nitrates synthétiques par fixation de l'azote atmosphérique (procédé Haber-Bosch).

- **Pas de nitrates, pas d'explosifs et pas de guerre. Les nitrates du Chili ou l'affirmation d'une matière première hautement stratégique**

Avant et pendant la Première Guerre mondiale, l'approvisionnement en poudres et explosifs de l'industrie de l'armement et donc la livraison aux armées des explosifs et munitions étaient en grande partie tributaires de l'accès (par les importations) aux nitrates du Chili. Les productions et exportations mondiales depuis le Chili qui étaient respectivement en 1913 de 2 738 000 et 2 660 000 tonnes s'élevèrent sous l'effet des besoins nés de la guerre à 2 980 000 tonnes et 2 967 000 tonnes en 1916, 2 776 000 tonnes et 2 798 000 tonnes en 1917 et 2 919 000 tonnes et 2 960 000 tonnes en 1918. Les consommations, les stocks et les importations en nitrates depuis le Chili étaient minutieusement suivies par le Ministère de la Guerre tandis que l'activité de l'industrie allemande et des Empires centraux en matière d'azote était observée, faisant l'objet de rapports détaillés conservés aux Service Historique de la Défense[141] et de nombreuses publications[142]. L'approvisionnement en nitrates devint, avec les obligations de fournir l'industrie en azote pour la fabrication des poudres et explosifs et donc des munitions, un enjeu central pour savoir comment poursuivre la guerre. Ces matières azotées furent précipitées par les circonstance de cette guerre au premier plan d'intérêts hautement stratégiques, au même titre que le fer et l'acier.

Une situation périlleuse de l'Allemagne

Dès le 4 août 1914, l'Angleterre prenait des dispositions pour empêcher l'arrivée de ces nitrates aux ports allemands. Des nitratiers allemands furent aussi coulés par la flotte de haute mer de la Grande-Bretagne. En octobre 1914, conscients de la valeur stratégique des nitrates, les Allemands s'emparèrent des stocks considérables en dormance dans les principaux ports belges (Anvers, Ostende, Gand, Bruges) d'où étaient importés avant-guerre les nitrates du Chili, soit 32 000 tonnes[143]. La pression militaire britannique sur les mers s'était couplée à des injonctions auprès des neutres de ne plus fournir l'Allemagne en nitrates en contrepartie du maintien de l'approvisionnement en nitrate d'outre-mer. « *Le gouvernement anglais se décida en février [ndlr : 1915] à déclarer le nitrate contrebande de guerre* [144]». « *Du mois d'août à la fin décembre 1914, 3 940 tonnes de nitrate, au lieu de 224 310 tonnes importées pendant la même période de l'année précédente* ». Le blocus maritime imposé par les Alliés et en particulier la flotte britannique fut efficace.

---

[140] Archives nationales, http://www.archivesnationales.culture.gouv.fr/camt/index.html. Diplomatic Archives diplomatiques, https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/archives-diplomatiques /; Centre des Archives de l'Economie et des Finances, https://www.economie.gouv.fr/caef.

[141] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 205 (170). Etat-Major de l'Armée. 2e Bureau I. Section économique. La question de l'azote dans les Empires Centraux. 18 octobre 1917. Non signé.

[142] Bibliothèque nationale de France. Matignon, C. (1917). « *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées. Première partie ». Revue des Sciences pures et appliquées.* Tome vingt-huitième. Octave Doin et Fils, Editeurs. Paris. p.7.

[143] *Ibid*, p.10.

[144] *Ibid,* p.9.

L'Allemagne importa en 1913, 774 000 tonnes de nitrates depuis le Chili, 691 000 tonnes en 1914, un tonnage s'effondrant à 19 000 en 1915, année au terme de laquelle ces importations furent totalement arrêtées[145]. Le blocus amputa l'Allemagne d'un peu plus de la moitié de ses approvisionnements en azote (l'autre moitié provenant pour l'essentiel du sulfate d'ammonium généré par les cokeries et usines à gaz).

La pénurie en azote au moment où la demande et les besoins des armées en poudres et explosifs étaient grandissants, mit l'Allemagne doublement en difficulté. Les productions de guerre étaient menacées mais aussi la production agricole domestique et donc la capacité de l'Allemagne à subvenir aux besoins alimentaires de sa population. En effet, les nitrates du Chili furent détournés de leurs usages agricoles d'avant-guerre vers la production de l'acide nitrique pour les poudres et explosifs azotés. La fabrication des matières énergétiques azotées nécessitait de l'acide nitrique, des hydrocarbures mais aussi de l'acide sulfurique. Cet acide fut également réservé pour les fabrications de guerre et de l'acide nitrique au détriment des engrais superphosphatés nécessaires à l'agriculture. En décembre 1914, on pouvait lire dans les colonnes des journaux *Norddeutscher Zeitung* (organe officieux) et *Kreuz Zeitung* (organe militaire) « *l'alimentation du peuple et le pouvoir de résistance de l'Allemagne peuvent souffrir par manque de sels azoté* ». Les journaux furent confisqués par la Police[146]. Les historiens estiment que l'Allemagne aurait perdu la guerre en 1916 si elle n'avait pas trouvé les moyens de subvenir par elle-même à ses besoins domestiques en azote[147].

L'Allemagne fut donc contrainte et forcée de trouver d'autres ressources en azote en mobilisant pour cela son industrie et l'inventivité des chimistes et ingénieurs pour poursuivre la production de poudres et d'explosifs et la guerre et nourrir la population.

Un approvisionnement fragile en France

La situation française concernant l'approvisionnement en nitrates resta longtemps fragile durant la guerre. Le plan de mobilisation prévoyait en France 1 300 tonnes d'acide nitrique par mois[148] qui était alors principalement produit au sein d'unités dédiées au sein même des poudreries nationales.

Les nitrates étaient alors en France majoritairement importés du Chili « *Le nitrate du Chili est importé par la maison Bordes, la maison Gibs et la Lautaro Cy*[149] » via les ports de Dunkerque, Nantes, Bordeaux. Un stock en nitrate de sodium équivalant à 12 mois de consommation aurait dû être constitué pour sécuriser la production d'acide nitrique. Or en 1915, l'industrie ne disposait que l'équivalent de trois mois de production courante[150].

---

[145] BundesArchiv Militär, Freiburg-im-Breisgau, cote BAM RH 61/837

[146] Matignon, C. (1917). « *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées* », op. cit.,p.11.

[147] Sicotte, R., Vizcarra, C., Wandschneider, K. (2009). *The Chilean Nitrate Industry: External Shocks and Policy Responses.* 1880-1935. p.5.

[148] *Ibid*, p.13.

[149] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 58. Sous-Secrétariat d'Etat de l'Artillerie et des Munitions. Cabinet. Service Technique. Réponse aux questions posées par M. Henry Berenger, Membre de la Commission Sénatoriale de l'Armée. Poudres & Explosifs. 24 août 1916.

[150] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Chambre des Députés. Commission de l'Armée. Deuxième rapport sur les matières premières destinées aux fabriques d'explosif sur le nitrate de soude et l'acide nitrique. Présenté à la Commission de l'Armée par M. Pierre Renaudel, Député. 2 février 1917.

Mais en 1915, la pression exercée par la guerre sous-marine allemande « *sape assez largement le programme chimique de guerre français élaboré à la mi-1915* [151]» et menaça directement les approvisionnements en azote. Dans un premier temps, l'importation de nitrates issus de stocks étrangers fut privilégiée « *il fallut encore se fournir directement à l'étranger, et en particulier aux États-Unis […]. Dans le cas des poudres on réduisait ainsi, dans le rapport de 12 à 1 voire de 13 à 1 dans le cas des explosifs, l'immobilisation du tonnage*[152] ». Mais les neutres furent aussi soumis à des restrictions de leurs exportations.

L'approvisionnement en azote était une question centrale dans l'effort de guerre. Sa fragilisation et des perspectives de son amenuisement s'avérèrent critiques aux yeux de l'Etat-Major et des industriels des poudres et explosifs. « *C'est l'arrêt de la production d'explosifs qui pointe à l'horizon*[153] ». Il devint alors impératif pour le Service des Poudres d'acquérir plus d'autonomie en matière d'approvisionnement en azote combiné, pour ne plus dépendre de l'étranger, en renforçant les capacités de production d'acide nitrique synthétique sur le sol français. Le Service des Poudres entreprit alors la construction de deux usines d'acide nitrique synthétique, l'une à Soulon (par le procédé Birkeland Eyde, à l'arc électrique) et l'autre, la plus importante, à la Poudrerie d'Angoulême (par le procédé cyanamide).

La Figure 19 présente l'évolution des stocks et de la consommation mensuelle française de nitrate de sodium (en tonnes) de juillet 1915 à octobre 1918. L'importation de nitrates du Chili se poursuivit dès 1916 jusqu'à la fin de la Première Guerre mondiale, sécurisée par la maîtrise des mers par la marine britannique. Les ratios entre besoins et demande restèrent tendus. Les livraisons de juillet 1916 s'élevèrent à 37 750 tonnes alors que la consommation mensuelle à cette date était de 36 000 tonnes, pour un stock estimé à 122 869 tonnes[154] (soit l'équivalent d'environ 3,5 mois de consommation). En 1916, les besoins en nitrate de sodium étaient de l'ordre de 20 000 tonnes par mois « *Depuis, les besoins ont encore augmenté ; ils sont de l'ordre de 30 à 40 000 T et dépasseront 50 000 T en 1917. Entre fin novembre 1916 et juillet 1917, la consommation quotidienne en nitrate s'éleva de 1 200 à 1 500 tonnes / jour. L'acide synthétique n'interviendrait alors que pour 6 à 7% de l'ensemble*[155] ». Les nitrates de sodium restèrent donc la principale source d'azote combiné pour la production de l'acide nitrique.

---

[151] Archives nationales, site de Pierrefitte, cote C 7519. Langlinay, E. (2018). « Les entreprises chimiques françaises et la Première Guerre mondiale *». In L'industrie dans la Grande Guerre* : Colloque des 15 et 16 novembre 2016 [en ligne]. Paris : Institut de la gestion publique et du développement économique, 2018.

[152] Archives Nationales, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, 94 AP 105. Pascal, P. (1925). Explosifs, poudres, gaz de combat, Paris, Hermann, 1925, p. 6. Pour une explication et un chiffrage plus détaillé, on se reportera à la note rédigée par Grimoux sur les approvisionnements du 8 mai 1917, Archives Nationales, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, cote 94 AP 105.

[153] Archives Nationales, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, 94 AP 103. Note sur la situation des approvisionnements en nitrate de soude, situation au 1er août 1917.

[154] Réponse aux questions posées par M. Henry Berenger, *op. cit.*

[155] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, 10 N 58. Observations du Ministre de l'Armement & des Fabrications de Guerre au sujet du rapport fait à la Commission sénatoriale de l'Armée sur les poudres, explosifs & produits chimiques de guerre par M. Henry Berenger, Sénateur (Adopté le 8 novembre 1916). p.17.

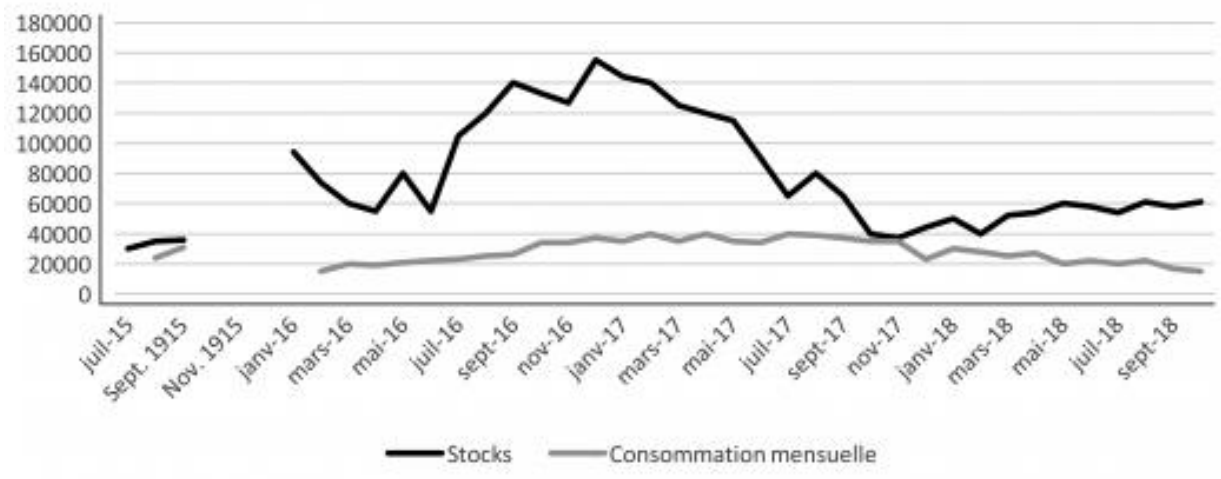


Figure 19 : Stocks et consommation mensuelle française de nitrate de sodium (en tonnes), juillet 1915-octobre 1918[156].

Usages des nitrates du Chili pour la synthèse des explosifs et poudres (organiques) nitrés

Pour saisir l'importance stratégique des sources d'azote, il convient de comprendre comment étaient produits les poudres et explosifs nitrés et/ou nitratés durant la guerre. La chimie des poudres et explosifs étaient essentiellement celle de l'azote organique (les NAC) et inorganique (nitrate et ammonium). L'ingrédient essentiel à la synthèse des produits chimiques hautement énergétiques était l'acide nitrique (HNO_3). Cet acide était traditionnellement produit par l'action de l'acide sulfurique (H_2SO_4) sur les nitrates ($NaNO_3$) bruts ou raffinés provenant du Chili selon la réaction :

$$H_2SO_4 + 2\ NaNO_3 \rightarrow 2\ HNO_3 + Na_2SO_4$$

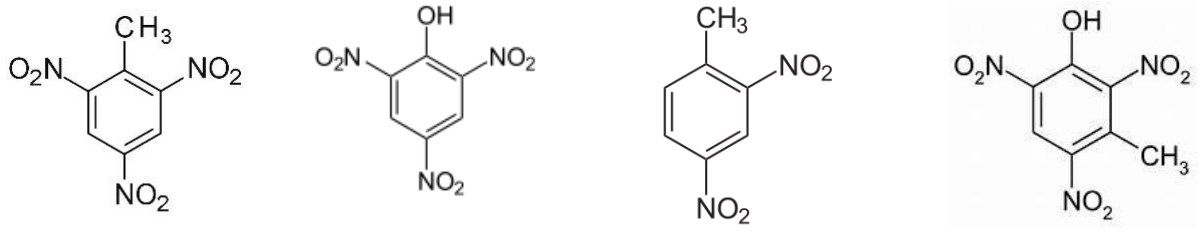
L'acide sulfurique était généré par le grillage de sulfures, notamment la pyrite (FeS_2), provenant de mines (poly)métalliques (d'Espagne, du Portugal, etc,) puis condensation des vapeurs sulfuriques dans des chambres au plomb. En août 1914, 2 000 tonnes d'acide sulfuriques (H_2SO_4) concentrés anhydres étaient nécessaires pour subvenir aux demandes des armées pour la production de NAC et d'acide nitrique à partir des nitrates. La production passa en janvier 1915 à 6 000 tonnes par mois tandis qu'à la même date celle de l'oléum **(**$H_2SO_4 \cdot (SO_3)_x$), atteignit 2 000 tonnes par mois[157].Les NAC étaient produits par synthèse, par une série de réactions chimiques désignées sous le terme de « sulfonitration ». Trois ingrédients étaient pour cela nécessaire (i) des hydrocarbures (benzène, toluène, phénols, etc.), (ii) de l'acide nitrique et (iii) de l'acide sulfurique anhydre ou sous forme d'oléum.

Le chimiste allemand Julius Wilbrand découvrit en 1863 le 2,4,6-trinitrotoluène (*Tolite*, TNT) (cf. Figure 20). Hepp synthétisa du TNT pur en 1880. Le TNT fut produit de façon industrielle dès 1891. Le TNT était un explosif brisant très apprécié pour sa grande puissance de détonation (brisance), sa grande stabilité, son insensibilité aux chocs et à la friction, mais aussi pour son point de fusion très bas (80°C) qui permettait de charger les projectiles en TNT « fondu ». Pour le TNT, la nitration du toluène s'effectuait en plusieurs étapes en présence d'un mélange d'acide nitrique (HNO_3) et d'acide sulfurique concentrés anhydres et d'oléum.

[156] Langlinay, E. (2018). « Les entreprises chimiques françaises et la Première Guerre mondiale », *op. cit.*
[157] Gabel, C. (1920) *Les explosifs pendant la Guerre de 1914-1918*, p.12. https://histoire.ec-lyon.fr/docannexe/file/1486/te1920_151.pdf

Etaient produits dans une première étape les 2- et 4-nitrotoluènes (liquides), repris dans une seconde étape de nitration qui permettait d'obtenir des dinitrotoluènes (solides) (cf. Figure 20), pour ensuite, en troisième étape de nitration obtenir le TNT (cristaux solides). Le TNT brut ainsi produit subit ensuite deux étapes de purification et de lavage. Le lavage initial à l'eau chaude, au contact de carbonate de sodium, générait des effluents très acides connus sous le nom *« d'eaux jaunes* ». Le TNT de formulation industrielle ainsi produit contenait environ 95% de 2,4,6-trinitrotoluène, 3% de 2,4,5-trinitrotoluène, 1,3% de 2,3,4-trinitrotoluène et 0,3% de 2,3,6-trinitrotoluène. Pour séparer les isomères (et ne conserver que le 2,4,6-trinitrotoluène le plus pur possible), un lavage par une solution de sulfite de sodium ou *Sellite* fut réalisé, processus durant lequel d'autres produits se formèrent au sein d'effluents alcalins connus sous le nom « *d'eaux rouges* » : les acides dinitrotoluène-sulfoniques, majoritairement les acides 2,4-dinitrotoluène 3-sulfoniques, et les acides 2,4-dinitrotoluène 5-sulfoniques.

Ces composés étaient particulièrement solubles dans l'eau. Le principe de production des autres NAC était similaire.



2,4,6-trinitrotoluène (TNT) ou Tolite (CAS 118-96-7)

2,4,6-trinitrophénol ou Mélinite (acide picrique) (CAS 88-89-1)

2,4-dinitrotoluène (DNT) (CAS 121-14-2)

2,4,6-trinitrocrésol ou Crésylite (CAS 602-99-3)

Figure 20 : Formules structurales du TNT, de la Mélinite, du dinitrotoluène et de la Crésylite

A noter que le TNT industriel pouvait encore renfermer, malgré les différentes phases de purification et de lavage, des impuretés peu solubles, comme notamment le 1,3,5-trinitrobenzène (1,3,5-TNB)[158].

Afin de produire plus rapidement les explosifs et autres matières énergétiques à moindre coûts, le procédé de sulfonitration classique décrit ci-avant fut adapté au regard des archives conservées au Service Historique de la Défense à Vincennes[159]. Pour gagner en temps et possiblement en coûts de production, les explosifs furent synthétisés à la Poudrerie nationale de Saint-Chamas (département des Bouches-du-Rhône) par un procédé dit de « nitration directe », qui consistait à shunter l'étape de nitration par l'acide nitrique en mettant directement en contact les hydrocarbures (phénols) préalablement acidifiés (sulfonation), avec des sels de nitrates (principalement $NaNO_3$) provenant du Chili (cf. Figure 21). L'acide nitrique en excès était collecté (vapeurs nitreuses), condensé et utilisé pour la sulfonitration du toluène pour former le TNT.

---

[158] Joos, A (2008). KORA Leitfaden. *Einschätzung und Berücksichtigung natürlicher Schadstoffverminderungsprozesse auf Standorte die mit sprengstofftypischen Verbindungen sowie deren Transformationsproduckten belastet sind*, op. cit., p.21.

[159] Service Historique de la Défense, site de Vincenne, 4 W 713, Ministère de la Guerre. 6e Direction. Poudres & Salpêtres. Poudrerie nationale de Saint-Chamas. Description des procédés de fabrication des explosifs azotés à la Poudrerie de Saint-Chamas (Livret d'inspection de 1909). 31 janvier 1910. Signé : Le Directeur (illisible).

Des rapports d'artilleurs font état de la présence dans la *Mélinite* de graviers particulièrement dangereux, susceptibles de générer des frictions internes à l'explosif, probablement provenant de restes insolubles et minéraux des minerais de nitrates du Chili utilisés pour leur synthèse.

Le coton et des chutes de la production du coton (*linter)* étaient la matière première d'où fut tirée la cellulose nécessaire à la synthèse de « coton-poudre » et « fulmicoton » attribué aux poudres propulsives (ergols) à base de nitrocellulose. La cellulose était traitée par un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique qui produisaient des ions nitronium qui réagirent avec les fonctions alcool de la cellulose pour former de la nitrocellulose. On obtint un mélange de mononitrate, dinitrate et trinitrate de cellulose. Le mononitrate était très inflammable et donnait le collodion (par dissolution dans un mélange 2/3-1/3 d'éther et d'alcool) utilisé pour les laques cellulosiques par exemple, en lutherie ou modélisme, ou même le vernis à ongle. Le dinitrate et surtout le trinitrate étaient des produits très dangereux et explosifs à l'état sec, qui étaient insolubles dans le mélange précédent mais totalement solubles dans l'acétone. Durant la Première Guerre mondiale, l'Allemagne connut la pénurie en linter qu'elle para en nitrant la cellulose du bois.

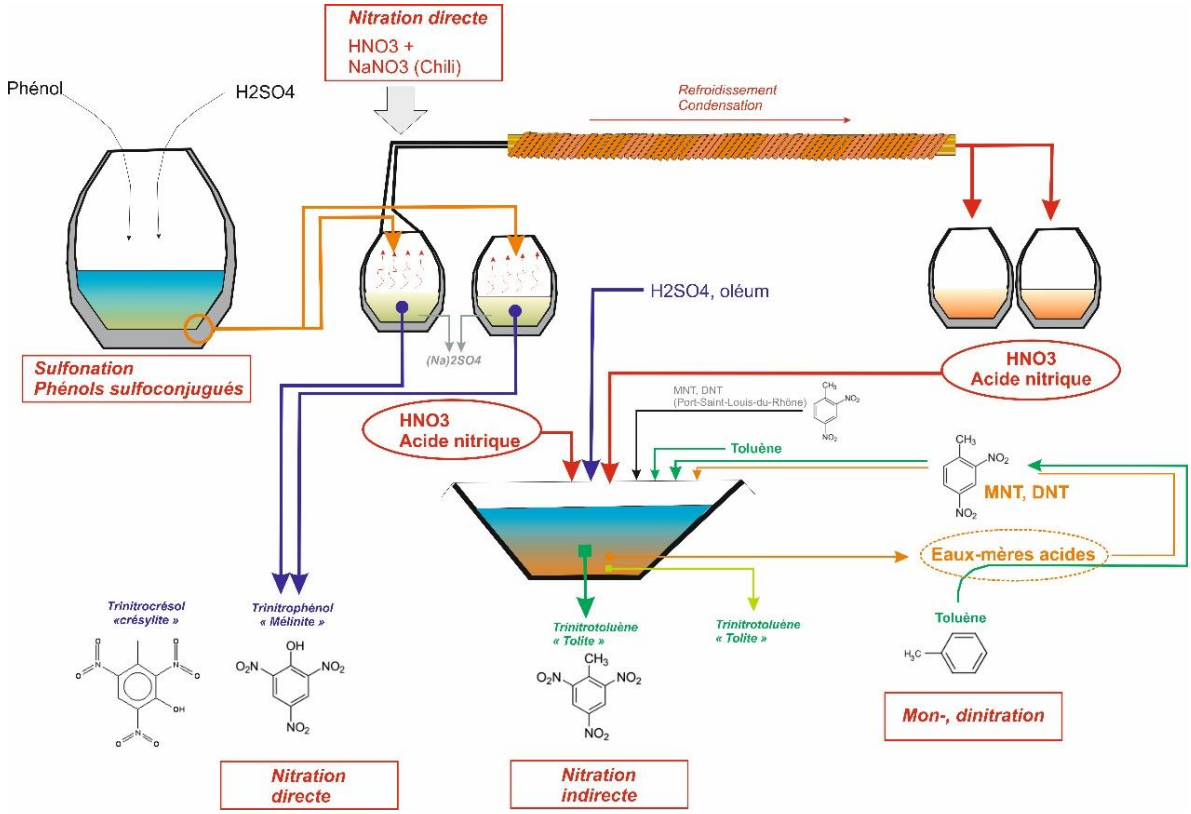


Figure 21 : Schéma de principe de la production de mélinite et de TNT à la Poudrerie nationale de Saint-Chamas (département des Bouches-du-Rhône) durant la Première Guerre mondiale[160].

Il n'y a aucune indication dans les archives consultées de la présence de perchlorate dans les sous-produits intermédiaires de production, les produits finis (ergols nitrocellulosiques, explosifs nitrés), les déchets solides et liquides (effluents) générés par cette production. L'hypothèse la plus plausible est celle de l'évacuation des ions perchlorate avec les effluents acides compte tenu de la solubilité très élevée des sels de perchlorate.

[160] Hubé, D. (2016). D'après Service Historique de la Défense. Ministère de la Guerre. 6e Direction. Poudres & Salpêtres. Poudrerie Nationale de Saint-Chamas. 31 janvier 1910. Description des procédés de fabrication des explosifs azotés à la poudrerie de Saint-Chamas.Signé : le Directeur (illisible).

Par contre, la présence de ces sels dans la poudre noire est parfaitement documentée dans certaines archives qui ont pu être rassemblées dans le cadre de cette recherche. Cette occurrence indésirable dans la poudre noire était connue, et ce bien avant la Première Guerre mondiale.

- **Un constat d'évidence de la pollution indésirable de la poudre noire (nitratée) par les perchlorates chiliens**

La poudre noire (ou poudre à canon) était un mélange énergétique formé par un carburant (des sulfures et du charbon de bois) avec un comburant (nitrate de potassium KNO_3). Il s'agissait de l'une des plus anciennes matières explosibles. La poudre déflagre. Le salpêtre entrait dans la composition de la poudre noire qui était le plus viel explosif utilisé. Au XIVe siècle et XVe siècle, la composition était (en masses) : 75% de salpêtre pour 12,5% de soufre et 12,5% de carbone sous forme de charbon de bois. Mais ultérieurement, on trouve des compositions variables selon les usages. Par exemple (pourcentages massiques):

- 30 % de charbon, 30 % de soufre, 40 % de salpêtre pour la poudre de mine (lente),
- ou bien 12 % de charbon, 10 % de soufre, 78 % de salpêtre pour la poudre de chasse,
- ou encore 15 % de charbon, 10 % de soufre, 75 % de salpêtre pour la poudre dite « de guerre f3 »,
- ou encore 33 % de charbon, 33 % de soufre, 33 % de salpêtre pour la poudre au tir sportif.

Différentes qualités de poudres noires furent composées, selon les usages auxquels elles étaient destinées, en jouant sur (i) les proportions des différents constituants et/ou (ii) la granulométrie et la géométrie des grains de poudre.

Le salpêtre (KNO_3) de la poudre noire était produit par une réaction dite de « conversion » en faisant réagir des nitrates de sodium ($NaNO_3$) au contact de potasse (KCl) selon la réaction :

$$NaNO_3 + KCl \rightarrow KNO_3 + NaCl$$

La présence de perchlorate en impuretés indésirables dans la poudre noire est avérée dans certaines archives consultées dans la présente recherche. Des analyses effectuées en 1894 en Allemagne, par des chimistes sur des lots de salpêtre entrant dans les formulations de poudre noire montrèrent que ces derniers renfermaient des teneurs élevées en perchlorate ClO_4^- dans tous les échantillons avec une teneur maximale relevée de 2,5 gClO_4^- par kilogramme de salpêtre[161]. La présence de ces impuretés instables et sensibles aux chocs et à la friction était connue des artilleurs et pyrotechniciens dès la fin du XIXe, suite, notamment, à des explosions accidentelles impliquant des projectiles chargés de poudre noire, comme à la Pyrotechnie de Bourges en 1899. « *Cette cause réside vraisemblablement dans une maladresse ou une imprudence commise par un des ouvriers employés au chargement. Il est à noter que cette imprudence […] n'aurait peut-être eu les suites que l'on déplore, sans la présence dans le salpêtre employé, d'une quantité de perchlorate de potasse relativement considérable* »[162]. Le salpêtre en question provenait de la raffinerie de Lille. Les teneurs en chlorate de potassium $KClO_3$ et en perchlorate de potassium $KClO_4$ calculées étaient, sur un lot de salpêtre, respectivement de 1,87 % et 2,11%[163].

[161] Haeussermann, C. (1894). « *Über de Gehalt der Salpeter an Perchlorat ». Chemiker-Zeitung*, n° 63 1894.

[162] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur l'accident survenu aux ateliers de chargement du Polygone le 18 mars 1899. N°31 – 19 avril 1899. p. 32.

[163] *Ibid*. p. 17.

Les ions perchlorate précipitaient depuis la solution de potasse et de nitrate de sodium avec les nitrates de potassium destinés à la fabrication de la poudre noire, sous forme de $KClO_4$ du fait d'un abattement de la solubilité de l'ion perchlorate en présence d'un excès de potassium, passant de 2 010 $g.L^{-1}$ pour $NaClO_4$ (à 20°C) à 15 $g.L^{-1}$ pour $KClO_4$ (à 25°C).

- **Perchlorate et l'azote fossile du charbon. Le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3).**

La distillation thermique de la houille (cuisson ou gazéification de la houille) dans les cokeries et les usines à gaz génère des gaz, qui une fois refroidis et condensés étaient source de goudrons, de benzols (dont on extrait le benzène, le toluène) mais, aussi en fin de chaîne de condensation, d'effluents ammoniaqués principalement chargés de sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2SO_4$. « *La houille contient toujours une petite quantité d'azote combiné, environ 1,3% en moyenne*[164] ». Mais les rendements d'extraction massique de cet azote étaient faibles « *cet azote est en grande partie perdu, car on ne recueille effectivement que […] seulement 1/5 de l'azote total contenu dans la houille consommée*[165] ».

L'azote présente dans la houille était donc récupéré sous forme de sulfate d'ammonium dans les effluents de condensation. De là, il était possible de produire le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), en faisant réagir les jus de condensation avec les nitrates de sodium.

Le pouvoir énergétique du nitrate d'ammonium mais aussi son instabilité furent démontrés par de bien tristes accidents comme les explosions d'Oppau en Allemagne le 21 septembre 1921[166], celle anniversaire, 80 ans plus tard, d'AZF à Toulouse, le 21 septembre 2001[167], en ou encore plus récemment dans le port de Beyrouth au Liban le 4 août 2020[168]. Le nitrate d'ammonium fut produit en France avant la fin de la Première Guerre mondiale par le procédé de raffinage des nitrates de sodium perchlorates et iodatés naturels chiliens par dissolution et précipitation puis épuration des $NaNO_3$. La précipitation de NH_4NO_3 était provoquée en faisant réagir $(NH_4)_2SO_4$, avec $NaNO_3$, puis cristallisation, selon la réaction[169] :

$$(NH_4)_2SO_4, + 2\ NaNO_3, \rightarrow 2\ NH_4NO_3 + Na_2SO_4$$

Ce nitrate d'ammonium était utilisé pour la confection des explosifs nitratés, comme, côté allemand, les *Amatols* (nitrate d'ammonium + *Tolite*). On constate que la réaction ci-dessus, est au même titre que celle conduisant à la production de poudre noire, une réaction de conversion. Un parallèle pour le nitrate d'ammonium peut être fait avec la poudre noire et l'occurrence dans ces nitrates d'ammonium d'ions perchlorate chiliens apparaît vraisemblable**,** bien que n'ayant pas été renseignée dans les archives et documents consultés dans le cadre de cette recherche. Il convient aussi de préciser ici que les potentialités de pollutions des nitrates d'ammonium par des perchlorates des nitrates chiliens était grandement dépendante de la qualité des nitrates utilisés (raffinés ou bruts).

Pour être utilisés dans la production d'explosifs organiques nitrés, les nitrates des salpêtres et l'ammonium devaient être transformés en acide nitrique, soit par conversion des nitrates au

---

[164] Matignon, C. (1917). *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées. Première partie,* op. cit.p.7.

[165] *Ibid.*

[166] Elle détruisit la majeure partie d'Oppau (commune rattachée à celle de Ludwigshafen en 1938), tua 561 personnes et blessa environ 2 000 personnes.

[167] Détonation qui tua 30 personnes, dont 21 employées sur le site, et en blessa quelque 2 500.

[168] Avec 150 morts et des milliers de blessés.

[169]Bibliothèque nationale de France. *Mémorial des Poudres et Salpêtres*. Biffe, 1882

contact d'acide sulfurique concentré ($2\ NaNO_3 + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 2\ HNO_3$) , soit par oxydation de l'ammonium / ammoniac gazeux (NH_3) (par oxydation catalytique en présence d'eau et d'air en excès) (procédé Oswald). Le devenir des ions perchlorate initialement présents dans les nitrates du Chili utilisés pour convertir le sulfate d'ammonium en nitrate d'ammonium n'est pas connu au regard des archives consultées. Il en est de même pour la qualité du raffinage des nitrates bruts du Chili. La présence d'impuretés de perchlorate au sein des nitrates d'ammonium largement utilisés par toutes les parties belligérantes dans la composition de leurs explosifs ne peut être écartée.

- **Puiser dans l'air de quoi faire la guerre. Genèse et affirmation de supplétifs aux nitrates du Chili**

« Nitrogen is supplying life's quality, while carbon provides the quantity »[170] .

L'atmosphère constitue un réservoir quasiment inépuisable d'azote. Cet élément gazeux (N_2) est essentiel à la vie, à la chimie organique (des poudres, explosifs, colorants, etc.) et à la production d'engrais (chimie minérale) où il est utilisé, non à l'état gazeux, mais combiné à l'oxygène (sous forme de sels de nitrates NO_3^- ou d'acide nitrique HNO_3) ou l'hydrogène (sous forme d'ammoniac NH_3 gazeux et de sels d'ammonium NH_4^+). La chimie, l'électrochimie de la Seconde Révolution industrielle avaient déjà enfanté de procédés permettant de produire de l'acide nitrique à partir de l'azote de l'atmosphère. Ces procédés étaient énergivores et incapables de subvenir durant la Grande Guerre aux besoins des armées. Il s'agissait (i) du procédé électrique Birkeland Eyde, (ii) du procédé chimique cyanamide, tous deux mis en œuvre en France comme en Allemagne. Le procédé Oswald permettait quant à lui de convertir l'ammoniac gazeux NH_3, issus des gaz de cokerie ou encore du procédé cyanamide, en acide nitrique par voie catalytique.

Procédé Birkeland Eyde

Le procédé Birkeland Eyde (du nom des deux inventeurs, cf. Figure 22 ci-contre) a été appliqué dans des usines norvégiennes sous brevet allemand. Il s'agit de la fixation thermoélectrique de l'azote atmosphérique en faisant passer un flux d'air au travers d'un arc électrique (à 3 000-3 500°C) aplati sous champ électromagnétique. Une faible proportion (1,5 à 5% du volume d'air) de l'azote N_2 de l'air est oxydé monoxyde d'azote NO qui réagit avec l'oxygène en excès pour donner du peroxyde d'azote NO_2.

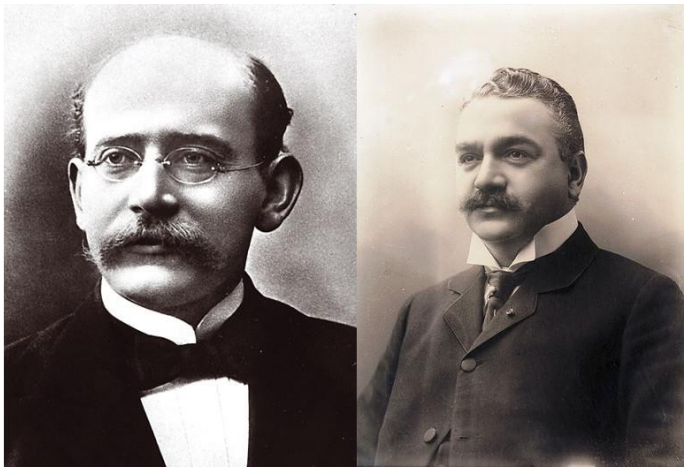


Figure 22 : Kristian Birkeland (à gauche) et Sam Eyde (à droite)[171].

[170] Pollan, M. (2006). *The Omnivore's Dilemma.* New York: Penguin Books Sepper, D.L. (1988) Goethe contra Newton: Polemics and the project for a new science of color. New York: Cambridge University Press.

[171] 1905: Three remarkable men. Kristian Birkeland, Sam Eyde and Marcus Wallenberg are regarded as Hydros founders. https://www.hydro.com/en/global/about-hydro/company-history/1900---1917/1905-three-remarkable-men/

NO_2 réagit après refroidissement avec H_2O pour former de l'acide nitrique HNO_3. Le procédé est extrêmement énergivore (3% de l'énergie dépensée est effectivement utilisée pour la réaction[172]).

Le procédé cyanamide

Le procédé cyanamide consiste à fixer l'azote atmosphérique sur du carbure de calcium (CaC_2) à chaud selon la réaction $N_2 + CaC_2 \rightarrow Ca(CN)_2$ (cyanamide calcique) + C (réaction de Frank et Caro). La cyanamide calcique est mise à réagir au contact de l'eau à chaud $Ca(CN)_2 + H_2O$ pour générer de l'ammoniac gazeux NH_3. Il est ensuite transformé en acide nitrique par le procédé Oswald.

Le procédé Oswald

Le procédé Oswald, du nom d'un chimiste allemand, consiste à transformer par voie catalytique l'ammoniac gazeux NH_3 (présent dans les condensats des gaz de cokerie et d'usine à gaz) en acide nitrique HNO_3. L'oxydation pouvait se faire directement à partir des gaz de cokerie par le procédé Hauser dérivé du procédé Oswald. Le procédé Oswald repose sur une réaction qui avait été découverte dès 1838 par Frédéric Kuhlmann. La réaction est opérée en trois temps.

(i) Combustion de l'ammoniac NH_3, à hautes températures selon la réaction $4\ NH_3 + 5\ O_2 \rightarrow 4\ NO + 6\ H_2O$.

(ii) Oxydation (catalytique, catalyseur Frank et Caro (oxyde de cérium et autres oxydes de terres rares)) du monoxyde d'azote en dioxyde d'azote $4\ NO + 2\ O_2 \rightarrow 4\ NO_2$.

(iii) Absorption de l'acide $4\ NO_2 + 2\ H_2O$ vapeur ou liquide $+ O_2 \rightarrow 4HNO_3$.

L'acide fortement dilué dans l'eau en excès est absorbée par un lait de chaux $Ca(OH)_2$ ou une solution d'ammoniaque. Ces absorptions alcalines produisent respectivement du nitrate de calcium $Ca(NO_3)_2$ et du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3).

La réponse industrielle de l'Allemagne au blocus maritime britannique. Le procédé Haber - Bosch

L'Allemagne apporta une réponse avant tout industrielle au blocus maritime britannique et aux pénuries critiques en azote combiné et « *Elle a pu conjurer le danger très grave qui la menaçait, cesser la guerre par manque de poudres et d'explosifs*[173] ». Elle sut développer et réorganiser son industrie en cherchant l'autonomie en matière d'azote en allant chercher l'azote atmosphérique et en le fixant efficacement. « *Par un effort considérable, grâce à sa puissante organisation chimique et à l'étude de procédés nouveaux nés à la veille de la guerre, l'Allemagne a pu suffire à ses besoins en azote combiné et constituer […] toute une industrie nouvelle dans le domaine de ces produits* ». Ce fut le début de la production de nitrate synthétique selon le procédé Haber-Bosch. Parallèlement, comme toujours en période de pénurie, des consignes furent passées aux exploitants des carrières de ne plus utiliser les explosifs nitratés, et de leur préférer ceux chloratés ou encore mieux, l'air comprimé[174].

---

[172] Bibliothèque nationale de France. Société académique de l'Aube. *Mémoire de la Société d'agriculture, sciences et arts du département de l'Aube. M. Bonnefoi. Note sur la fixation de l'azote atmosphérique*. Non daté. Vers 1910.

[173] Matignon, C. (1917). « *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées* », op cit. p.9.

[174] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 895. *Tonindustrie – Zeitung*. Versorgung der Steinbruchbetriebe mit Sprengstoffen im Kriege. Berlin NW 21, Sonnabend, den 14. Juni 1916.

En 1909 le chimiste allemand Fritz Haber (cf. Figure 23 ci-contre) parvint à fixer l'azote atmosphérique au laboratoire. En 1913, une équipe de recherche de la société BASF[175] dirigée par Carl Bosch mit au point la première application industrielle des travaux d'Haber, une recherche et développement qui donna naissance au procédé dénommé Haber-Bosch. L'ammoniac est synthétisé en combinant un volume d'azote (N_2) avec trois volumes d'hydrogène (H_2) en présence de fer poreux comme catalyseur selon la réaction :

$$N_2 + 3\,H_2 \rightarrow 2\,NH_3\ (\Delta H = -92{,}4\ \text{kJ mol}^{-1})$$
(réaction exothermique).

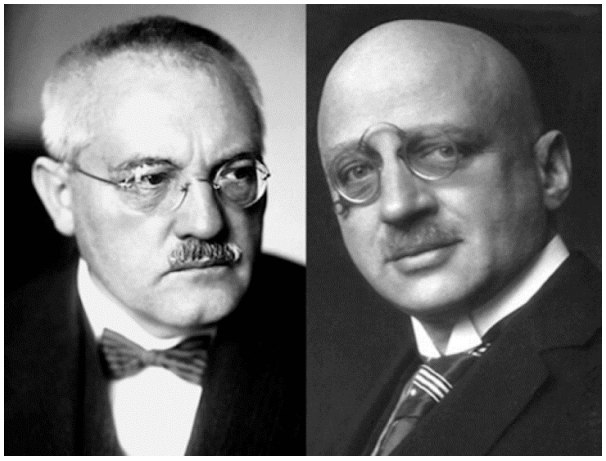


Figure 23 : Fritz Haber (à droite) et Carl Bosch (à gauche)[176].

Le procédé Haber opère cette réaction sous une température optimale de 1022°F (550°C) (la réaction étant très lente, l'apport d'énergie thermique permet d'en augmenter significativement la cinétique) et une pression très élevée de 2 175 à 3 626 psi (15 à 25 MPa), respectivement. Ce procédé ouvrit la voie à toute une nouvelle branche de la chimie de synthèse : la chimie des hautes pressions (appareils industriels capables de fonctionner dans des conditions nouvelles à l'époque : une pression de l'ordre de 20 MPa et une température de l'ordre de 600 °C). La construction de réacteurs susceptibles de résister à ces conditions extrêmes fut rendue possible, comme pour les canons, par les progrès de la métallurgie et des aciers spéciaux. La société BASF fut à même de fabriquer industriellement l'ammoniac à partir de 1913. Le site d'Oppau (proche de Ludwigshaffen) démarra sa production le 9 septembre. La même année, jusqu'à 30 tonnes d'ammoniac par jour furent produites[177]. Des tonnages considérables d'ammoniac synthétique sortirent de l'usine d'Oppau durant la guerre. En 1916, ils s'élevèrent à 330 000 tonnes, soit l'équivalent de la moitié du sulfate d'ammonium tiré de la houille pour la même année.

Durant l'entre-deux-guerres, la synthèse, à moindre coût par l'optimisation à l'échelle industrielle du procédé Haber-Bosch, des nitrates depuis l'atmosphère a contribué à l'expansion de l'agriculture intensive permettant de soutenir la croissance démographique mondiale. Peu de procédés industriels n'ont eu autant d'impact sur la démographie mondiale, bien au-delà de l'Armistice, que celui né sur les paillasses des centres de recherche allemands avant-guerre puis formalisés de façon opérationnelle dans les usines allemandes par la force des choses durant la Grande Guerre « *Par un effort considérable, grâce à sa puissante organisation chimique et à l'étude de procédés nouveaux nés à la veille de la guerre, l'Allemagne a pu suffire à ses besoins en azote combiné et constitué […] toute une industrie nouvelle dans le domaine de ces produits. Elle a pu conjurer le danger très grave qui la menaçait : cesser la guerre par manque de poudres et d'explosifs* ».

[175] *Badische Anilin und Soda Fabrik*, littéralement « Fabrique badoise d'aniline et de soude ».

[176] Fritz Haber and Carl Bosch: *The chemists who revolutionized fertilizer production and 'changed the world for the better* (2021) https://geneticliteracyproject.org/2021/01/29/fritz-haber-and-carl-bosch-the-chemists-who-revolutionized-fertilizer-production-changing-agriculture-forever/

[177] Jayant M. Modak (2002). « *Haber Process for Ammonia Synthesis ». Résonance*.

L'auteur insiste sur la hauteur stratégique de la question de l'azote par une parabole uchronique « *l'industrie chimique a vraisemblablement sauvé les Empires centraux d'un désastre sans précédent, et l'on peut ajouter que la guerre, se produisant dans les mêmes conditions quelques années plus tôt, aurait amené la chute certaine de l'Allemagne*[178] ».

Très rapidement, la production de nitrates synthétiques dépassa les tonnages de nitrates du Chili importés en Allemagne avant-guerre. A compter des années 20, avec le développement à l'échelle industrielle en Allemagne durant la Grande Guerre du procédé de fixation de l'azote atmosphérique sous pression Haber-Bosch (cf. Figure 24), puis sa mise en production par les principales puissances industrielles, l'ammoniac et les nitrates de synthèse suppléèrent les nitrates du Chili comme source d'azote.

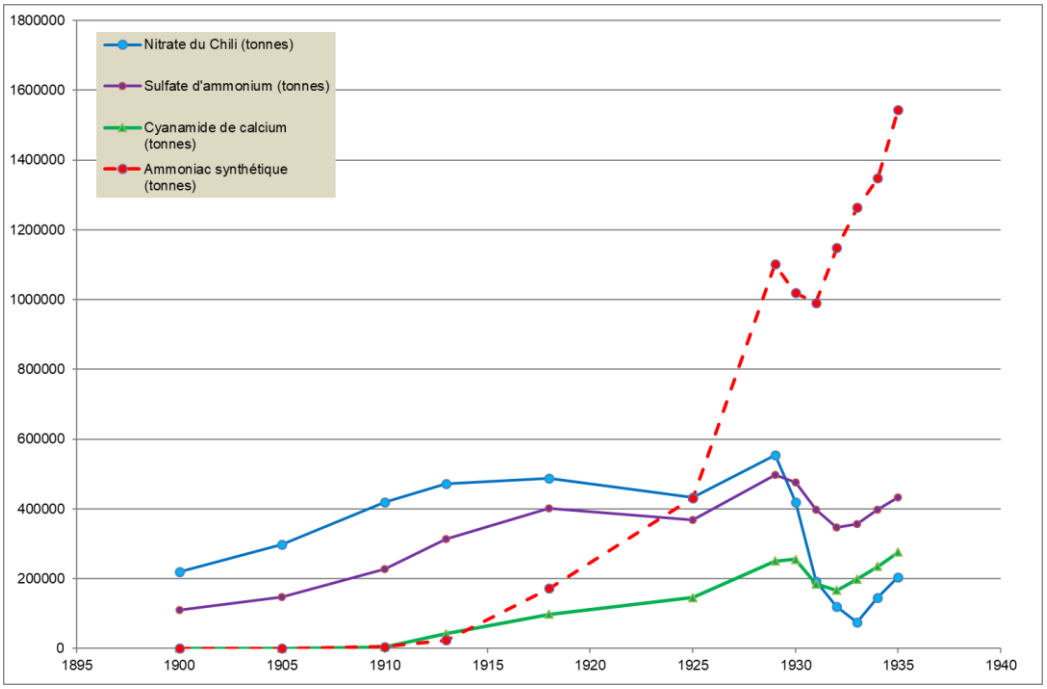


Figure 24 : Production mondiale de nitrates du Chili, de sulfate d'ammonium, de cyanamide de calcium et d'ammoniac synthétique[179]

La Première Guerre mondiale n'a fourni que des vaincus, sauf l'industrie allemande, sortie grandie, notamment sous l'impulsion des besoins en azote. Le prix Nobel de chimie pour l'année 1918 fut décerné à Fritz Haber en juin 1920 pour le développement de son procédé « pour la synthèse de l'ammoniac à partir de ses éléments[180] ».

[178] Matignon, C. (1917). « *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées* », op. cit. p 8-9.

[179] *U.S. Tariff Commission, 1937.*

[180] The Nobel Prize in Chemistry 1918. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Mon. 2 Sep 2024. https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1918/summary/.

- **Conclusion**

L'Azote est à la base de la chimie des poudres et explosifs. L'approvisionnement en azote combiné, pour produire aisément et à moindre coût de l'acide nitrique devint stratégique dans un contexte militaire et géostratégique dès 1915, année à partir de laquelle l'Artillerie tenait le front et s'affirmait comme l'arme décisive pour espérer prendre l'avantage. Les nitrates renfermés dans les salpêtres naturels importés du Chili constituaient la principale source d'azote employée à la fabrication des explosifs azotés (nitrés, via la conversion des nitrates en acide nitrique), des explosifs nitratés (nitrate d'ammonium et poudre noire) et des ergols nitrocellulosiques. La Figure 25 propose une synthèse du devenir des nitrates du Chili dans les différentes branches de production de matières énergétiques azotées durant la Première Guerre mondiale. Ces nitrates chiliens, également historiquement utilisés comme engrais dans la culture intensive de la betterave sucrière, sont réputés naturellement perchlorates. La « pollution » de la poudre noire par ces perchlorates indésirables était connue depuis la fin du XIXe siècle. Les archives consultées dans le cadre de cette recherche ne font aucunement mention de l'occurrence d'ions perchlorate dans d'autres compositions nitrées et/ou nitratées. Le devenir des ions perchlorate et autres impuretés des nitrates du Chili (comme les sels d'iodates) dans le processus conduisant à l'acide nitrique puis à la nitration d'explosifs nitrés n'est pas connu. La présence d'ions perchlorate dans le nitrate d'ammonium semble possible, celle dans les explosifs organiques nitrés et les ergols nitrocellulosique moins probable du fait des phases de lavage poussées auxquelles ces matières énergétiques furent soumises. Les ions perchlorate auraient dans ce dernier cas été évacués avec les effluents de lavage et les eaux acides résiduaires avec lesquels ils auraient pu rejoindre l'environnement. Ainsi, si des formulations d'explosifs explicitement perchloratées (à base de sels de perchlorate de synthèse) furent bien massivement produites et utilisées durant le premier conflit mondial, d'autres, en particulier nitratées, pourraient renfermer des ions perchlorate naturels originaires du Chili en impuretés.

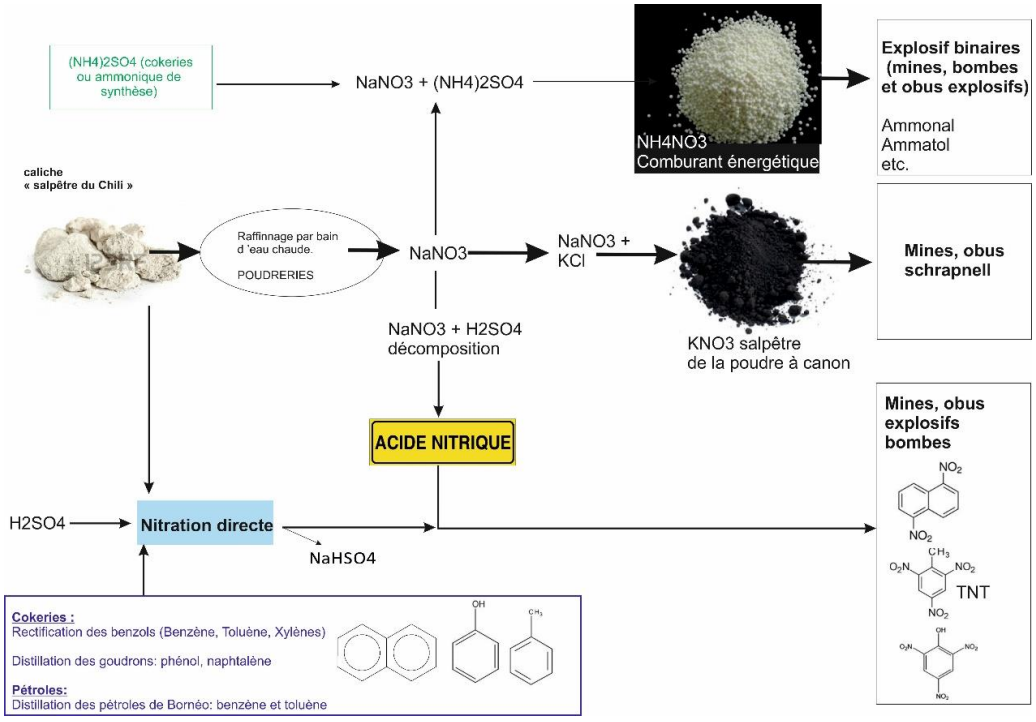


Figure 25 : Usages des sources d'azote de synthèse et d'azote naturel dans la production de matières énergétiques[181].

[181] Hubé, D. (2016).

Durant la Première Guerre mondiale la production à grande échelle des poudres, explosifs, toxiques de guerre et engins de guerre fut mise sous tension par les besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne, par la disponibilité d'une main-d'œuvre et l'accessibilité aux ressources minérales et énergétiques pour les satisfaire. La satisfaction des besoins de l'industrie des poudres et explosifs en azote combiné par l'importation outre-mer en nitrates du Chili fut fragilisée en France par l'importance de la consommation en nitrates et la quasi absence de stocks en réserve, alors qu'en Allemagne l'approvisionnement depuis le Chili fut rompu par le blocus maritime imposé par la marine britannique. Ces situations délicates sur le plan industriel puis militaire contraignirent les parties à rechercher des approvisionnements en azote alternatifs, (i) en développant à plus grande échelle des procédés de fixation de l'air atmosphérique déjà existants (cyanamide, Birkeland Eyde), (ii) en accentuant l'extraction de l'azote issue de la houille et du charbon (couplé au procédé Oswald) et (iii) en développant et mettant en œuvre à l'échelle industriel des procédés nouveau, comme, pour les Allemands, le procédé sous-pression Haber-Bosch. La France eut également recours à l'importation de nitrates synthétiques depuis des neutres (et la Norvège notamment).

Se pose la question si l'azote combinée synthétique atmosphérique pouvait être une source d'ions (per)chlorate dans les nitrates utilisés pour la fabrication des poudres et explosifs nitrés et/ou nitratés. Aucune source archivistique n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche documentant l'occurrence d'ions perchlorate dans ces nitrates de synthèse.

Le procédé cyanamide était strictement chimique et ne pouvait en aucun cas générer des ions perchlorate. Il en était de même pour le procédé physique Haber-Bosch. Il convient ici de souligner que l'arc électrique du procédé Birkeland Eyde généra au contact de l'oxygène atmosphérique de l'ozone O_3 et que des conditions proches de celles de la formation des sels de perchlorates dans la haute atmosphère devaient être réunies dans ces réacteurs si des chlorures étaient présents dans l'air électrolysé. L'acide nitrique produit par ce procédé pouvait potentiellement renfermer des ions perchlorate en impuretés. Aucune information sur la qualité de cet acide nitrique Birkeland Eyde n'a été identifiée dans la documentation et les archives rassemblées et consultées dans le cadre de la présente recherche.

Résumé et conclusion

Des explosifs puissants, brisants, chloratés et perchloratés furent produits par l'industrie électrochimique et celle des poudres et explosifs durant la Grande Guerre, et particulièrement en France, pour charger les engins de l'artillerie de tranchée, bombes, grenades et autres pétards. Cet usage massif était une spécificité française liée aux ressources disponibles sur le territoire non occupé pour produire des explosifs répondants aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne tout en palliant aux carences en explosifs hydrocarbonés (nitrés), à réserver pour des usages exigeants en matière de sécurité, dans l'artillerie de campagne et l'artillerie lourde. Différentes formulations d'explosifs furent employées à des usages spécifiques et évoluant selon des considérations techniques, militaires mais aussi économiques. Les formulations explicitement chloratées ou perchloratées identifiées dans le cadre de cette recherche sont rassemblées dans le Tableau 2 suivant :

Désignation	Type	Composition	Origine	Usages
Explosif O N°6.B	Chloraté	90 % de $KClO_3$ (chlorate de potassium), 7 % de paraffine et 3 % de vaseline.	France	Fourneaux de mine, grenades, ses pétards, bombes de tranchées et d'aviation.
Explosif S	Chloraté	90 % de $NaClO_3$ (chlorate de sodium), 7 % de paraffine et 3 % de vaseline.	France	Chargement des bombes de tranchées lourdes, de calibre 240 mm et 340 mm.
Explosifs Ch 86 / 14	Perchloraté	86% de NH_4ClO_4 (perchlorate d'ammonium) et 14% de paraffine.	France	Chargement des bombes de mortier 58T, dont le « Crapouillot ».
Explosif P	Perchloraté nitraté	61,5% de NH_4ClO_4 (perchlorate d'ammonium), 30% $NaNO_3$ (de nitrate de sodium) et 8,5% de paraffine.	France	Chargement des bombes de mortier 58T et 150T.
Explosif 90 / 10	Perchloraté	90% de NH_4ClO_4 (perchlorate d'ammonium) et 10% de paraffine.	France	Chargement de bombes d'aviation.
Explosif E	Perchloraté	92% de NH_4ClO_4 (perchlorate d'ammonium) et 8% de paraffine.	France	?
Perchloratite	Perchloraté nitré	56 % de $KClO_4$ (perchlorate de potassium), 32 % de dinitrobenzène, et 12 % dinitronaphthalène.	Allemagne	Chargement de bombes d'artillerie de tranchée (*Minen*).
Perdite	Perchloraté nitré nitraté	72 % de NH_4NO_3 (nitrate d'ammonium), 10 % de $KClO_4$ (perchlorate de potassium). 3 % de sciure de bois, et 15 % de di- et tri-nitrotoluène	Allemagne	Chargement de bombes d'artillerie de tranchée (*Minen*) et fourneaux de mines.
Amorces	Chloraté	30 % de $Hg(CNO)_2$ (fulminate de mercure), 50 % de $KClO_3$ (chlorate de potassium) et de 20 % SbS (sulfure d'antimoine) ou mélange de fulminate de mercure et $KClO_3$.	Allemagne	Amorces de fusées percutantes
Certains *Ammonals*	Perchloraté nitré nitraté	41% de $KClO_4$ (perchlorate de potassium), 27% de NH_4NO_3 (nitrate d'ammonium), 18% de Al° (aluminium métal) et 14% de 2,4,6-trinitrotoluène (TNT)	Grande - Bretagne	Chargement de projectiles de mortiers *Stokes* de calibre 3 *inch.*
Sabulite	Perchloraté nitré nitraté	51 % de NH_4NO_3 (nitrate d'ammonium), 10% de NH_4ClO_4 (perchlorate d'ammonium), 15% de TNT 15 % et 24% de NaCl.	Grande - Bretagne	Fourneaux de mines

Tableau 2 : Formulations d'explosifs explicitement chlorates et perchlorates de la Première Guerre mondiale identifiées dans le cadre de la recherche.

Parallèlement à ces perchlorates synthétiques affichés comme entrant explicitement dans la composition d'explosifs (*Cheddites* et *Percheddites*, *Perdites*, etc.) il convient de considérer l'occurrence de perchlorates naturels en impuretés dans les nitrates du Chili, principale source d'azote combiné dont on tirait l'acide nitrique. La présence d'ions perchlorate accompagnant les explosifs nitrés est peu vraisemblable compte tenu des procédés de fabrication et des exigences de pureté de ces explosifs destinés à l'Artillerie. La présence (indésirable) des perchlorates chiliens apparaît vraisemblable dans le nitrate d'ammonium produit à base de nitrate du Chili et a été démontrée dans la poudre noire déjà avant la Première Guerre mondiale. L'association des perchlorates aux nitrates dans les nitrates naturels du Chili est connue. Il est possible que le procédé de fixation de l'azote atmosphérique à l'arc électrique Birkeland Eyde puisse aussi être à l'origine de perchlorates en impuretés dans l'acide nitrique synthétique ainsi produite. Les procédés chimiques (cyanamide) et physiques (Haber-Bosch) de fixation de l'azote atmosphérique ne peuvent être à l'origine de la formation de sels de perchlorate.

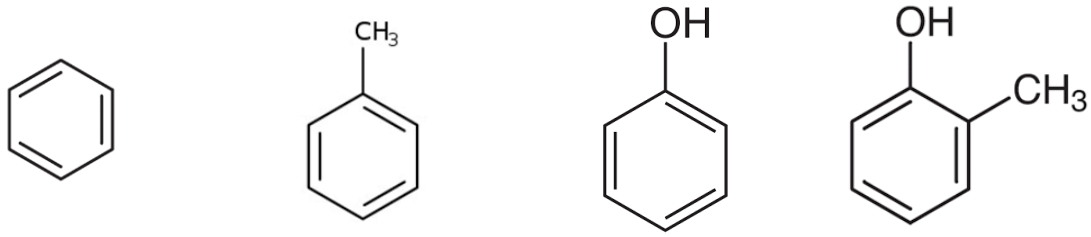
La littérature publiée et les archives consultées dans le cadre de cette recherche ne font pas mention d'occurrences de perchlorates dans les explosifs nitrés, le nitrate d'ammonium ou encore l'acide nitrique générée par les procédés à l'arc électrique.

3.2.2 Composition des chargements non (per)chlorates

Chargements explosifs des projectiles de l'artillerie lourde et de campagne française

Les explosifs réglementaires en service au sein de l'Artillerie française au moment de la déclaration de guerre en août 1914 étaient principalement constitués de *Mélinite* (acide picrique ou 2,4,6-trinitrophénol) et en moindre mesure de poudre noire (pour les obus à balles).

Avec l'entrée en guerre de l'Allemagne et l'arrêt des relations commerciales franco-allemandes, c'était toute la chaine d'approvisionnement en phénol, toluène, crésol, nécessaires à la production d'explosifs qui fut rompue. L'approvisionnement en matières premières se posa avec d'autant plus d'acuité que la France perdit avec l'invasion du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, sa principale source de houille, de laquelle on tirait (par cokéfaction) le coke pour la fabrication de l'acier dans les haut-fourneaux mais aussi le benzène, le toluène, le phénol (pour les explosifs nitrés) (cf. Figure 26) et le sulfate d'ammonium (pour les explosifs nitratés).



Benzène (CAS : 71-43-2) | *Toluène (méthyl-benzène) (CAS : 108-88-3)* | *Phénol (CAS : 108-95-2)* | *Crésol (isomère 2-méthyl-phénol) (CAS : 95-48-7)*

Figure 26 : Formules structurales du benzène, toluène, phénol et crésol.

Enfin, la consommation en munitions, poudres et explosifs dépassa de loin toutes les prévisions alors qu'aucune des parties n'avait songé à constituer avant-guerre des stocks de munitions, d'explosifs et encore moins des matières premières indispensables à leur production. Les obus à balles, qui dotaient pour 3/5e les batteries de canons de 75 mm, prévus pour soutenir l'Infanterie dans des combats à terrain découvert dans la guerre de mouvement de 1914, s'avérèrent d'une efficacité tactique limitée dans la guerre de siège qui s'installa dès la fin 1914. Ces obus qui ne renfermaient qu'une faible charge explosive (de poudre noire) devaient être substitués par des obus à chargement explosif.

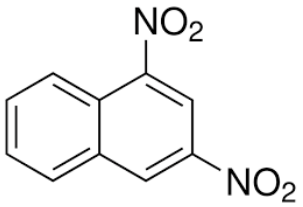
Cette situation contraignit l'Etat-Major à rechercher des « *explosifs de remplacement et des formules nouvelles*[182] » pour pallier aux difficultés d'approvisionnement en matières premières utilisées pour la fabrication des explosifs réglementaire en service en temps de guerre.

C'est ainsi que des chargements de projectiles d'artillerie à base de perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4) et de paraffine furent mis à l'étude mais rapidement écartés dès janvier 1915 du fait d'accidents de tir dus à la sensibilité de l'explosif à la friction et aux chocs. Comme cela a été développé dans ce qui précède, relatif aux explosifs (per)chlorates, ces explosifs chlorés furent d'emblée fléchés pour charger des projectiles à faible vitesse de l'artillerie de tranchée et les grenades (à main et à tromblon).

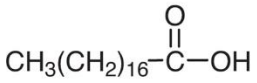
[182] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 244. Extrait d'un rapport sur l'état des productions des poudres et explosifs adressé au Général d'Armée Camille Walch. Non signé, non daté. 1916.

L'armée se tourna aussi vers des explosifs civils disponibles. L'explosif de sureté anti grisouteux employés dans les mines charbon du Nord dès la fin du XXe siècle sous le nom d'explosif *Favier* (encore désigné par *NN°IC*) était un mélange de nitrate d'ammonium (87,5%) et de dinitronaphtalène (DNN) (12,5%) (cf. Figure 26). Connu dans l'industrie militaire sous le nom de *Schneiderite* (en lien avec l'entreprise Schneider), cet explosif chargea des projectiles exportés par la France et utilisés durant les guerres balkaniques où il donna entière satisfaction.

D'abord utilisé en morceaux concassés fondus dans la *Tolite* (TNT, 2,4,6-trinitrotoluène, cf. Figure 20), donnant à ce chargement l'apparence de « nougat », la *Schneiderite* fut utilisée pure, pulvérulente chargée par compression courant 1915 du fait des pénuries en *Tolite*. Chargée en comprimé, la *Schneiderite* convenait aux petits calibres, ceux inférieur à 120 mm. Le nitrate d'ammonium était principalement importé des Etats-Unis et de Norvège avant 1916. Le naphtalène, le toluène, le xylène, le benzène (cf. Figure 26), étaient obtenus par distillation des premiers sous-produits de condensation des gaz de pyrolyse des charbons (les goudrons et huiles de benzols). La *Tolite* fut employée dans une formulation d'*Amatol* (pour « Ammonium » et « *Tolite* ») dénommée Explosif NT (70% NH_4NO_3, 30% TNT)[183].



Dinitronaphtalène (isomère 1,3-DNN) (CAS : 606-37-1).



Acide stéarique (CAS : 67701-03-5).

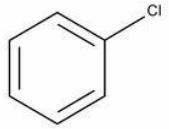
Figure 27 : Formules structurales dinitronaphtalène et de l'acide stéarique.

La *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol) devint l'explosif standard réglementaire de l'artillerie française, utilisée seule ou en mélange avec d'autres composés nitrés et/ou nitratés. La *Mélinite* mélangée à hauteur de 88% à la paraffine formait une composition plastique résistante la compression provoquée par des vitesses élevées au coup de départ. Elle était adaptée au chargement des projectiles de l'artillerie lourde. Le chargement en *Mélinite* fondue, bien que techniquement faisable, fut écarté, car exigeait des précautions minutieuses de sécurité incompatibles avec les rendements de production attendus dans les usines et poudreries par les besoins des armées. On lui préféra un mélange fondu de *Mélinite* à 30% de mononitronaphtalène et de *Mélinite* à 10% de dinitronaphtalène[184].

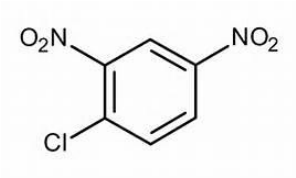
Le déficit de *Tolite* fut compensé par l'usage d'explosifs nouveaux, qui n'avaient jusqu'alors pas trouvé de finalités militaires, mais qui pouvaient être produits avec les matières premières alors disponibles. Il s'agissait (i) des mono- et di-nitronaphtalènes, des composés nitrés basés sur la chimie du naphtalène produit par les usines à gaz et cokeries, (ii) du dinitrophénol obtenu par l'intermédiaire de dérivés chlorés du benzène (le monochlorobenzène (MCB) et le dinitrochlorobenzène (DNCB) disponibles dans l'industrie chimique de synthèse française) (cf. Figure 28).

[183] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 58, Principaux explosifs employés au chargement des projectiles d'artillerie. Non daté.

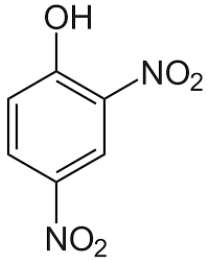
[184] *Ibid.*



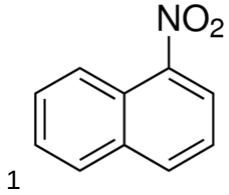
Monochlorobenzène (MCB) (CAS : 108-90-7).



1-Chloro-2,4-dinitrobenzène (DNCB) (CAS : 97-00-7).



Dinitrophénol (CAS : 51-28-5).



1-Nitronaphtalène (NN) (CAS : 86-57-7).

Figure 28 : Formules structurales du monochlorobenzène, chloronitrobenzène, dinitrophénol et du nitronaphtalène.

Un *Ammonal* fut également mis à l'étude, constitué d'un mélange de nitrate d'ammonium (86%), d'aluminium métal Al° pulvérulent (6%) et d'acide stéarique (8%) (cf. Figure 27) (Explosif Berger)[185] .

Les explosifs suivants étaient chargés en comprimé (i) *Mélinite* paraffinée, (ii) *Explosif Berger*, (iii) *Schneiderite* et *Explosif NT*.

Avec ces NAC, l'industrie des explosifs réalisa un certain nombre de mélanges fondant entre 80 et 90°C) (i) des mélanges binaires comme le *M.M.N* (*Mélinite*, MonoNitronaphtalène (cf. Figure 28)), (ii) des mélanges ternaires comme le *M.D.P.C*. (*Mélinite*, DinitroPhénol (cf. Figure 28) et *Crésylite* (cf. Figure 20)). L'explosif *M.P*., le plus utilisé pour le chargement des obus en comprimé pendant la Première Guerre mondiale, était théoriquement constitué de 88 % de *Mélinite* et de 12 % de paraffine. L'explosif *M.Dn*, était constitué de 70 % de *Mélinite* et 30 % de dinitronaphtalène et utilisé pour le chargement en fondu ou en comprimé[186].

Les nitronaphtalènes jouaient aussi le rôle de flegmatisants, c'est-à-dire de substances facilitant et sécurisant le chargement des obus. Le Tableau 3 présente la nature des chargements des obus explosifs français d'artillerie lourde selon les calibres à partir du calibre de 90 mm, montrant le caractère ubiquitaire de la *Mélinite* dans la composition des chargements. En octobre 1915 les autorités militaires en charge de l'Artillerie craignirent de ne pouvoir subvenir à l'approvisionnement en certaines matières essentielles à la synthèse des explosifs et notamment en benzène. Des explosifs dits « de secours » furent alors étudiés, produits et réservés dans l'éventualité de pénuries en explosifs réglementaires en service ; ils étaient dérivés de la *Mélinite* et de la *Schneiderite*. Un *Ammonal* bien particulier fut aussi retenu, constitué de nitrate d'ammonium, de sulfocyanate d'ammonium et d'aluminium métal Al° pulvérulent.

[185] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 58, Principaux explosifs employés au chargement des projectiles d'artillerie. Non daté.

[186] Ministère de l'Intérieur. Sécurité civile. Déminage. Rapport technique « Gouffre de Jardel ». Confidentiel, non publié.

CHARGEMENT DES OBUS EXPLOSIFS DE L'ARTILLERIE LOURDE			NATURE DU CHARGEMENT					
Calibre	Désignation	Poids d'explosif chargé (kg)	*Mélinite* + dinitronaphtalène (fondu) (MDn)	*Mélinite* + mononitronaphtalène (fondu) (MMN)	*Schneidérite* comprimée à la presse; âme en TNT (ScPT)	*Schneidérite* + *Tolite* (TNT) (nougat) (ST)	*Mélinite* paraffinée (comprimée) (MP)	Divers à base de *Mélinite* (fondu)
90	Obus en fonte aciérée Modèle 1914	0,92	■	■				
90	Obus allongé en acier Modèle 1888 à œil de 36	1,7	■		■			
95	Obus en fonte aciérée Modèle 1914	1,43	■	■				
95	Obus allongé en acier Modèle 1914	2,3	■		■			
100	Obus explosif en acier Modèle 1915	1,62	■		■	■		
105	Obus en acier Modèle 1916	2,075	■	■				
120	Obus en fonte aciérée Modèle 1915	1,95	■	■				
120	Obus en fonte aciérée pour obusier oeil de 40	1,95	■	■				
120	Obus en fonte aciérée pour obusier œil de 47, 5-S	1,925	■	■				
120	Obus allongé en acier Modèle 1914, oeil de 47	4,32	■		■			■
155	Obus en fonte aciérée Modèle 1914	4,68	■	■				
155	Obus allongé en acier Modèle 1914, œil de 63	10,5	■				■	■
220	Obus en fonte aciérée Modèle 1914	19,6	■					
220	Obus en acier Modèle 1909	30,67					■	
270	Obus en fonte aciérée Modèle 1915	29	■					
270	Obus P en acier de 4 calibres Modèles 1893-1901	68	■					
270	Obus en acier de 3 calibres Modèles 1893-1901	38,44					■	
280	Obus en fonte aciérée Modèle 1915	36,3	■					
280	Obus allongé en acier Modèle 1914	63,5					■	
370	Obus allongé en acier Modèle 1914	150					■	
30	Obus en acier à amorçage de culot Modèle 1915	73,5	■					

CHARGEMENT DE l'ALGP (Artillerie Lourde Grande Portée)			NATURE DU CHARGEMENT					
Calibre	Désignation	Poids d'explosif chargé (kg)	*Mélinite* + dinitronaphtalène (fondu) (MDn)	*Mélinite* + mononitronaphtalène (fondu) (MMN)	*Schneidérite* comprimée à la presse; âme en TNT (ScPT)	*Schneidérite* + *Tolite* (TNT) (nougat) (ST)	*Mélinite* paraffinée (comprimée) (MP)	Divers à base de *Mélinite* (fondu)
14	Obus en acier type D	5,34	■					
16	Obus en fonte aciérée type D	4,95	■					
19	Obus en fonte aciérée D	8,2	■					
24 & 240	Obus en fonte aciérée D (bouchon)	17,15	■					
24 & 240	Obus en fonte aciérée Modèle 1916	18	■					
24 & 240	Obus en acier P (F. ogive et bouchon)	33	■					
24 & 240	Obus fonte aciérée Modèle 1916	26	■					
274	Obus en acier à amorçage de culot (coiffe)	19,4	■					
274	Obus en acier à amorçage de tête	33,4	■					
274	Obus en fonte aciérée	20,1	■					
293	Obus en acier à amorçage de culot	40	■					
293	Obus en acier à amorçage de tête	63,8					■	
293	Obus en fonte aciérée	24,6	■					
305	Obus en acier à amorçage de culot (coiffe)	29,5	■					
305	Obus en fonte aciérée	32,07	■					
32	Obus en acier à amorçage de tête D	70	■					
32	Obus en acier A.C	50	■					
32	Obus en fonte aciérée D	35	■					
34	Obus en fonte aciérée Modèle 1915	52,53	■					
34	Obus en acier à amorçage de tête D	64,15	■					
370	Obus en acier à amorçage C	72,34	■					
370	Obus en fonte aciérée	58,5	■					
370	Obus en acier à amorçage de tête D	143,3	■					
400	obus en acier A.C	90	■					
400	Obus en fonte aciérée	72,5	■					
400	Obus en acier à amorçage de tête	180,2	■					
145	Obus en acier Modèle 1916	5,95	■					
145	Obus en fonte aciérée Modèle 1916	3,55	■					
200	Obus en fonte aciérée Modèle 1915	9	■					

Tableau 3 : Chargement des obus explosifs d'artillerie lourde française durant la Première Guerre mondiale[187].

[187] D'après les archives du Service Historique de la Défense, site de Vincennes.

Chargements explosifs des projectiles de l'artillerie allemande

L'Allemagne entra en guerre en 1914 avec une indéniable longueur d'avance sur la France tant sur le plan militaire qu'industriel. L'Allemagne était déjà avant-guerre à la tête d'une puissante industrie de la chimie de l'azote (chimie des colorants notamment) sans laquelle elle n'aurait pu mener quatre ans de guerre engageant autant de matériels, canons, munitions et explosifs. Le 13 août 1914, le Ministère allemand de la Guerre créa l'Office des matières premières de guerre KRA (*Kriegsrohstoffabteilung),* puis dès le 30 septembre 1914, l'Office de la Chimie de Guerre, le KCA AG (*Kriegschemikalien Aktien Gesellschaft*)[188], la corporation des industriels de la chimie. Cet office était axé autour de trois alliances industrielles géantes : la BASF sur le Rhin supérieur (Ludwigshafen), Bayer associé depuis 1904 à AGFA[189] de Berlin, et l'alliance Höchst-Cassella and Kalle, situé autour de Frankfurt-am-Main. Les Allemands étaient alors maîtres d'une industrie chimique bien adaptée aux productions de guerre et assez souple pour passer rapidement d'un produit à l'autre dès que cela s'avérait nécessaire. La chimie des colorants de synthèse (comme l'indigo) était basée sur celles des composés aromatiques associés à l'azote, qui se rapprochait de celle des poudres et explosifs. Un changement minime dans les procédés permit de transformer la production de biens de paix en celle de biens de guerre. Puis fin 1914, l'armée allemande comptabilisa 7 000 pièces d'artillerie (dont 2 000 pièces d'artillerie lourde et d'obusiers lourds de siège) avec en réserve environ 20 millions d'obus (ce qui représentait plus que les dotations réunies des forces françaises et russes alors réunies). Mais avec l'échec du plan Schlieffen, les Allemands durent se rendre à l'évidence que les obus universels « *Einheitsgeschoss* » combinant obus explosif et obus à balles, qui s'avérèrent efficaces sur le front de l'Est, étaient inopérants pour espérer rompre le front occidental. Des obus explosifs en grandes quantités étaient nécessaires et l'industrie se mobilisa en ce sens.

De nombreuses formulations d'explosifs nitrés, nitratés (binaires et ternaires) furent produites durant la Grande Guerre pour doter les projectiles de l'Artillerie allemande en chargements explosifs. Les formulations et la nature des explosifs employés évoluèrent durant le conflit. Quatre phases se succédèrent en Allemagne

i) <u>De l'ouverture des hostilités à fin 1914</u>, les explosifs réglementaires étaient disponibles « *en abondance* » ; il s'agissait alors de (i) l'acide picrique désignée par *Granatfüllung 1888* ou *Grf88*, chargeant des obus à l'intrados vernis ou étamés, ou en comprimé conditionné dans une enveloppe de carton vernie[190], (ii) le TNT désigné par *Füllpulver 1902* ou *Fp 02* en fondu ou comprimé et (iii) le mélange binaire *Füllpulver 60 / 40* ou *Fp 60 / 40* constitué de 60% de TNT et de 40% de nitrate d'ammonium, fondu directement dans le corps des obus;

[188] Johnson, J.A. (2006). « Technological mobilization and munitions production: comparative perspectives on Germany and Austria ». In *Frontline and Factories. Comparative Perspectives on the Chemical Industry at War. 1914-1924*. Mac Leod, R. Johnson, J.A. Editors. Spinger. 2006.

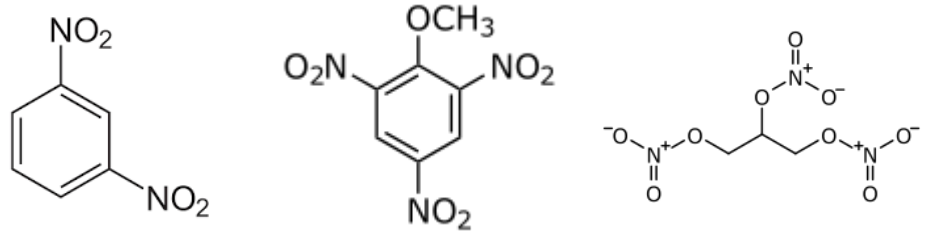
[189] *Aktiengesellschaft für Anilin Fabrikation AG.*

[190] L'acide picrique corrode l'intrados en acier des obus, une réaction qui produit des sels nommés « picrates » très instables et sensibles aux chocs et à la friction.

ii) De la fin 1914 à l'automne 1915, les explosifs réglementaires se raréfièrent et furent remplacés en proportions notables (non renseignées) par des explosifs industriels (civils) comme les *Donarite* et *Westfalite* qui étaient des explosifs de mine nitrés nitratés dits de suretés ou *Sicherheitsprengstoff* [191], à base de nitrate d'ammonium (70 à 90 %) mélangé à un explosif nitré (10 à 20 %) tels que le dinitrotoluène (cf. Figure 29), le trinitrotoluène, etc.; de plus, de petites quantités de nitroglycérine (3 à 5 %), de farine, etc., furent ajoutées pour améliorer la détonation et la « brisance » des explosifs. Ces explosifs servirent surtout au chargement des bombes de tranchée, mais ils pouvaient aussi être utilisés pour le chargement des obus tirés par les canons, particulièrement quand ils ne contenaient pas de nitroglycérine (*Donarite A* et *Westfalite A*).

iii) De l'automne 1915 à l'automne 1917**,** l'effort de guerre et l'organisation de l'industrie chimique fournirent l'armée allemande en explosifs réglementaires, mais toujours accompagnés d'explosifs industriels et enfin

iv) De l'automne 1917 à la fin de la guerre, les anciens explosifs réglementaires étaient toujours employés, mais le nombre d'explosifs « de secours » (ou *Ersatzsprengstoffe*) et de remplacement ne fit qu'augmenter pour parer à la pénurie progressive des explosifs standards. Les explosifs perchlorates firent ainsi leur apparition dans l'artillerie de tranchée et le Génie (*Pionniere*). Les Allemands eurent ainsi recours à des explosifs de piètre qualité comme le dinitrobenzène (DNB) (Di), les dinitrotoluènes (DNT) et les dérivés nitrés du naphtalène. On peut aussi signaler le trinitroanisol (An) (ou acide picrique méthylé), le trinitroanisol 60/40 (*An 60/40*), mélange de 60% de trinitroanisol (cf. Figure 29) avec 40% de nitrate d'ammonium (que les Allemands ont utilisèrent surtout dans les chargements des projectiles lancés par les engins de tranchée sous l'appellation *Nitrolite 60/40*).



1,3-Dinitrobenzène (DNB) (CAS : 99-65-0). *Trinitroanisole (2-Methoxy-1,3,5-trinitrobenzène)(CAS : 606-35-9).* *Nitroglycérine (Trinitrate de glycérol (NG) (CAS : 55-63-0).*

Figure 29 : Formules structurales du dinitrobenzène, dinitrotoluène, trinitroanisole et de la nitroglycérine.

Concernant les projectiles de l'artillerie de tranchée (bombes de *Minenwerfer*, grenades, pétards), des explosifs nitrés nitratés furent aussi employés au côté des explosifs perchloratés (*Perchloratite, Perdite*). Il s'agissait principalement d'explosifs de sureté (formé de paires de sels nitrates alcalins + chlorure d'ammonium) et d'explosifs anti grisouteux (*Wettersprengstoffe*) détournés de leurs usages civils en mines et carrières, pour être utilisés à des fins militaires afin de préserver les explosifs réglementaires nitrés, couteux à produire (*Grf 88, Fp 60 / 40, Fp 02*) et exigeant pour des raisons de sécurité à l'emploi une grande pureté.

[191] Schwarte (1920). *Die Technik im Weltkriege unter Mitwirkung von 45 Technikern und militärischen Fachwissenschaftlichen Mitarbeitern* herausgeben von M. Schwarte Generalleutnant z. D. Berlin, 1920. Ernst Siegfried, Mittler und Sohn.

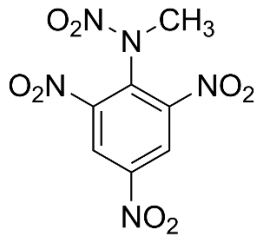
Dans cette catégorie d'explosifs, on peut citer les *Donarite* et la *Westfalite*, explosifs de mine à base de nitrate d'ammonium (70 à 90 %) mélangé à un explosif nitré (10 à 20 %) tels que le dinitrotoluène, le trinitrotoluène, etc.; de plus, de petites quantités de nitroglycérine (3 à 5 %), de farine, etc., étaient ajoutées pour améliorer la détonation. Ces explosifs chargèrent aussi les fourneaux dans la guerre souterraine (cf. Section 3h du présent manuscrit). Le *Glückauf* (G) était un explosif de mine analogue aux précédents (85 % de nitrate d'ammonium, 5 % de dinitrobenzène, 10 % de sciure de bois). La *Lignosite* (L), le *Fam* (F), la *Wodanite* (Wo), la *Perrompite,* (P), l'*Aldorfite* (A) furent aussi utilisés. La *Carbonite* était un explosif anti grisouteux constitué de 25-35 % de nitroglycérine, 25-30 % de nitrates alcalins et 35-40 % de sciure de bois.

L'Allemagne utilisa des explosifs nitrés d'une grande diversité notamment à la fin de la guerre, qui témoigne du recours à des explosifs de secours pour palier au pénuries en explosifs de grande pureté exigés pour charger les projectiles d'artillerie lourde et de campagne. On peut également citer[192] :

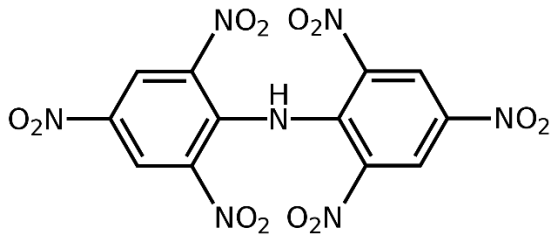
- La tétranitrométhylaniline (encore appelée *Tétryl*) (cf. Figure 30) et ses dérivés (trinitraniline ou picramide, et la tétranilraniline, proches de l'acide picrique). Le *Tétryl* est un explosif beaucoup plus puissant que le coton-poudre, l'acide picrique ou la *Tolite*, très stable et d'un emploi facile. Il aurait été utilisés par les Allemands pour confectionner des cordons détonants et les détonateurs de certaines bombes d'aviation ;

- L'hexanitrodiphénylamine (cf. Figure 30) qui dérive de la diphénylamine, ou phénylaniline. C'est un explosif puissant et sensible aux chocs. Les Allemands l'employaient, mélangé à la *Tolite* (60% de TNT, 40% d'hexanitrodiphénylamine), pour le chargement des bombes pisciformes lancées par avion ;

- La dinitro-oxypyridine. Rare, cet explosif, qui a l'aspect et la couleur du sable fin, n'a été rencontré que dans le chargement des grenades plates, percutantes, abandonnées en 1918.



Tétranitrométhylaniline (Tétryl) (CAS : 479-45-8).

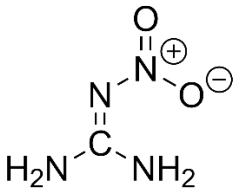


Hexanitrodiphénylamine (CAS : 131-73-7).

Figure 30 : Formules structurales de la Tétranitrométhylaniline (Tétryl) et de la Hexanitrodiphénylamine

[192] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Bulletin de renseignements du génie / Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est, Inspection générale des travaux et organisations aux armées. *Les explosifs de l'ennemi*. Septembre 1918. pp. 14-27

La Nitroguanidine (NIGU) (cf. formule structurale ci-contre) également appelée *Picrite*, fut utilisée pendant la Première Guerre mondiale par l'Allemagne, dans la formulation de certaines charges explosives, en particulier en association avec le nitrate d'ammonium et la paraffine. Ces explosifs étaient utilisés dans les obus de mortier de tranchée. Ce composé fut aussi largement utilisé dans les formulations d'ergols solides triple base, certaines poudres sans fumées, pour diminuer l'usure des fûts des canons en raison de sa propriété à réduite la température des déflagrations.



Pour de plus amples informations concernant la grande diversité des explosifs allemands de la Grande Guerre, le lecteur peut se référer au dictionnaire des mélanges explosifs allemands de R. Haas[193] (1996).

Chargements explosifs des projectiles de l'Artillerie alliée

Concernant les explosifs brisants, les Britanniques chargèrent essentiellement leurs engins d'artillerie de campagne, lourde et de tranchée au TNT et à la *Mélinite* (dénommée *Lyddite*), totalisant entre 1914 et 1918, 251 000 tonnes auxquels s'ajoutent les 300 000 tonnes de nitrate d'ammonium, essentiellement vouées à entrer dans la fabrication des pains d'explosifs (*Ammonal*) des puissants fourneaux de mines de sape. La Grande-Bretagne exporta également vers la France des dinitronaphtalènes avec comme monnaie d'échange la livraison par la France de perchlorate d'ammonium NH_4ClO_4 pour la confection de certains mélanges explosifs qui seraient restés d'un usage limité (*Sabulite*[194]). Le Canada et autres dominions (Afrique du Sud et ANZAC) furent dotés des matériels de la Grande-Bretagne, alors que pour les Etats-Unis qui n'entrèrent en guerre de façon opérationnelle qu'au début de l'année 1918, ce furent la France et les Britanniques qui leur livrèrent une grande partie de leurs matériels et munitions.

Chargement en Poudre noire

La *Poudre noire* (communément appelée « *Poudre à canon »*), mélange de salpêtre KNO_3 avec du charbon finement broyé, fut encore utilisée dans certaines applications durant la Première Guerre mondiale, comme par exemple dans des grenades, dans des mines de sape (charges souterraines) ou encore, comme charge de propulsion de certains obus à balles « *La Poudre noire […] servait hier et, sans doute, sert aujourd'hui encore, à charger l'obus à balles ou shrapnell. [..] quand celle-ci déflagre, l'obus s'ouvre, fait office de canon et les balles se répandent en avant chassée par l'explosion* [195]». Les charges d'expulsion étaient placées au culot (charge arrière) ou en position axiale. La *Poudre noire* fut aussi utilisée par le Génie pour le chargement de fourneaux de camouflets dans la conduite de la guerre souterraine (cf. Section 3h du présent manuscrit).

[193] Dr. Rainer Haas, Dipl. Ing. Jürgen Thieme (1996). *Lexikon der deutschen Explosivstoffmischung*en, *op. cit.*

[194] Mélanges de nitrate d'ammonium, de perchlorate d'ammonium, de TNT, et de NaCl.

[195] Henry De Varigny (1916). *Explosions et explosifs*, *op. cit*., p. 47.

L'usage, illicite (contre le droit international sur la guerre) de *Poudre noire* dans des balles explosives « *Dum Dum* », dites à expansion, est aussi mentionné[196].

3.2.3 Poudres sans fumée et chargement en ergols solides (propulseurs)

Les Poudres sans fumée, une découverte majeure en balistique

En 1884, le chimiste et pyrotechnicien Paul Vieille (cf. Figure 31 ci-contre) inventa au Laboratoire Central des Poudres et Salpêtres à Paris la « *Poudre sans fumée* » à base de nitrocellulose (cf. Figure 34), obtenue par sulfonitration de cellulose, principalement provenant de déchets de production du coton (ou *Linter)*. La particularité de la nitrocellulose tenait au fait que la teneur en azote définissait ses propriétés chimiques desquelles découlaient différents usages. En effet, lorsque la teneur en azote était inférieure à 12%, la nitrocellulose était utilisée comme vernis et films protecteurs (collodion). Si la teneur était supérieure à 12%, la nitrocellulose était utilisée comme explosif secondaire (fulmicoton, coton-poudre, pyroxyle) et comme base des ergols des projectiles d'artillerie et d'armes portatives (SAA, *Small Arms Ammunition*).

Figure 31 : Paul Marie Eugène Vieille (2 Septembre 1854-14 Janvier 1934)[197].

Elle présentait alors par rapport à la poudre noire trois avantages majeurs.

La nitrocellulose devint d'abord d'un intérêt balistique suite à la découverte de sa propension à être gélatinisée. La gélanitasion s'obtint en dissolvant la nitrocellulose dans un mélange d'alcool (éthanol) à 90° et d'éther et une fois malaxée, elle pouvait être mise en pâte, puis laminée à plat et séchée. « […] *cette nitrocellulose peut facilement être taillée en lames, ou baguettes de forme rigoureusement identiques, et, partant, fournir des charges qui, elles aussi, sont rigoureusement identiques. D'un côté par sa lenteur relative de combustion, la nitrocellulose assure l'action progressive sur le projectile ; de l'autre, elle permet, par la constance absolue des éléments explosifs, l'obtention de charges identiques*[198] ». L'homogénéité de la nitrocellulose conditionnable à façon apporta une réponse technique aux besoins de l'Artillerie en terme de précision des tirs répétés et d'augmentation des portées. De Varigny concluait ainsi en ces termes « *La grande portée est acquise, et la précision du tir subsiste. Double profit*[199] » puis souligne le troisième avantage de la nitrocellulose « *Un troisième s'y joint : l'absence de fumée*[200] » qui valut à ces ergols le qualificatif en France, par Paul Vieille, de « *Poudre sans fumée* ».

---

[196] Henry De Varigny (1916). *Explosions et explosifs*, *op. cit*., p. 52-53.

[197] Portait de Paul Vieille, 1934, https://tpemunitions.weebly.com/personnages-importants.html

[198] *Ibid*. p. 59.

[199] *Ibid.*

[200] *Ibid.*

Le tir de jour d'une batterie au moyen d'ergols nitrocellulosiques, n'était plus visible à distance par l'adversaire par la fumée produite par les bouches à feu[201]. *« C'est une poudre progressive, « rationalisée »*[202] » qui optimisait par sa vitesse de déflagration l'énergie impulsée au projectile durant le tir, qui devint aussi discret. Cette poudre propulsive à base de nitrocellulose fut rapidement adoptée par l'armée française (puis les armées étrangères).

La poudre pyroxylée baptisée *Poudre B* (« B » comme « blanche », par opposition à la poudre noire, alors appelée *Poudre N* (N pour « noire »), ou comme référence au nom du général Boulanger alors Ministre de la guerre) était composée de 68,2 % de nitrocellulose « insoluble », 29,8 % nitrocellulose « soluble » (collodion) gélifiée par l'éther et 2 % paraffine. Du fait de la persistance de quelques défauts de stabilité et de vieillissement, des modifications furent apportées à sa formulation qui donnèrent la *Poudre BF* en 1887. Parallèlement, Alfred Nobel mit au point la même année la *Balistite,* mélange à parties égales de nitroglycérine et de nitrocellulose. De la *Balistite* de Nobel fut dérivée la *Cordite* inventée en Grande-Bretagne et qui fut également largement utilisée pour l'armement portatif et l'Artillerie. La *Balistite* évolua en 1915 car elle avait tendance à user prématurément les âmes des canons à longue portée. Elle fut dans un premier temps réservée à la propulsion de certaines bombes de tranchée. Une « *Balistite atténuée* » fut alors mise au point pour la propulsion des canons courts. La nitrocellulose était associée à la nitroglycérine et aux dinitrotoluènes[203]. Il s'agit de la seule application des DNT dans les matières énergétiques françaises connue identifiée dans les archives.

La nitrocellulose, une matière métastable et dangereuse

La nitrocellulose des poudres sans fumée était, par essence, une matière énergique métastable qui, en vieillissant, exsudait l'excès d'acide nitrique qui catalysait la détérioration et accélérait la décomposition. Ces réactions étaient exothermiques (dégagent de la chaleur). La poudre devint instable, sensible aux chocs, à la friction avec en corollaire des risques d'auto-inflammation. Deux accidents tragiques survinrent, rappelant les propriétés indésirables de la poudre sans fumée.

---

[201] D'autres moyens de repérages de l'Artillerie adverse ont été mis en œuvre durant la Première Guerre mondiale : (i) l'observation aérienne avec l'essor de l'aviation de reconnaissance et (ii) localisation du bruit provoqué par les tirs par des localisateurs acoustiques (*sound-ranging*).

[202] Henry De Varigny (1916). *Explosions et explosifs, op cit.* p. 60.

[203] Service Historique de la Défense, site de Vincenne. Ministère de l'Armement et des Fabrications de Guerre. Note faisant connaître les observations auxquelles a donné lieu la lecture du rapport présenté à la Commission de l'Armée, le 2 février 1917, par M. Renaudel, Député, sur les matières premières destinées aux fabriques d'explosifs, sur le nitrate de soude et l'acide nitrique. 19 mai 1917, *op. cit*.

Le 25 septembre 1911, le cuirassé français pré-*Dreadnought Liberté* mouillant en rade de Toulon entra soudainement en explosion, suite à un incendie qui se déclara à bord, touchant la soute à munitions où était entreposées des poudres propulsives sans fumée (cf. Figure 32). Les effets se firent ressentir jusque sur terre. Des vitres furent brisées, des meubles déplacés[204].On déplora pas moins de 300 victimes. L'événement fut vécu comme une véritable catastrophe.

Figure 32 : Epave déchiquetée du cuirassé d'escadre Liberte, dans la rade de Toulon, apres la catastrophe du 25 septembre 1911[205].

Cette explosion rafraichit le souvenir d'un accident similaire, survenu quatre ans plus tôt, le mardi 12 mars 1907. Le cuirassé *Iéna* qui était entré depuis quelques jours dans un des bassins de carénage de Missiessy - dans le port militaire de Toulon - pour une visite de sa coque, fut éventré par une série de déflagration faisant suite à la rapide propagation d'un incendie. Les dégâts matériels et humains (avec 118 morts, dont sept officiers parmi lesquels le capitaine de vaisseau) furent considérables. Une enquête parlementaire sur les causes de l'accident fut immédiatement ouverte. Le gouvernement Clemenceau constitua une commission mixte, la Commission scientifique d'étude des poudres de guerre, créée le 6 avril 1907 par décret du président Fallières. L'enquête mit en cause l'instabilité de la poudre sans fumée « B ». Le remplissage en eau des soutes de l'Iéna qui était en cale sèche, et donc l'ennoyage de la poudre, ne purent être effectués.

L'amélioration et la diversification des formulations pour plus de sécurité et d'efficacité

Suite à ces accidents, des modifications à la formulation de la poudre sans fumée furent apportées par les pyrotechniciens afin de pallier aux défauts de stabilité, conduisant à la *Poudre BN3F* avant la Première Guerre mondiale. La nitrocellulose, insoluble, dut être stockée dans l'eau ou dans des conditions d'humidité importante (> 25 %) pour être considérée comme sans danger. Des stabilisants furent combinés à la nitrocellulose pour augmenter sa durée de vie, sécuriser son stockage et ses usages et absorber les vapeurs nitreuses qui se dégageaient de la nitrocellulose. Les stabilisants les plus couramment utilisés étaient les diphénylamines, les dinitrodiphénylamines et les phénylurées (cf. Figure 34). Les obus du canon de campagne de 75 mm modèle 1897 étaient propulsées par une *Poudre B - Variété BD* qui était un ergol solide à simple base stabilisé à la diphénylamine. La cartouche en renfermait pour les obus explosifs 700 grammes, en lamelles de140 mm de longueur, de 18 mm de largeur et d'un millimètre d'épaisseur assemblées en fagot. La composition chimique de la *Poudre BD* était la suivante : 98,5% de nitrocellulose, 1,5% de diphénylamine, avec des traces résiduelles de solvant de fabrication (mélange d'éther et d'alcool) et d'humidité. Le taux d'azote de la nitrocellulose pour *Poudre BD* était de 12, 8% pour un mélange de 30% de *Coton-poudre n° 1* et de 70% de *Coton-poudre n° 2*.

[204] Bibliothèque nationale de France *« A trois kilomètres de la ville, un officier est tué raide », L'Ouest-Eclair,* n°4529, 26 septembre 1911, p. 2.

[205] Clerc-Rampal, G. The University of Washington Libraries. 1913.

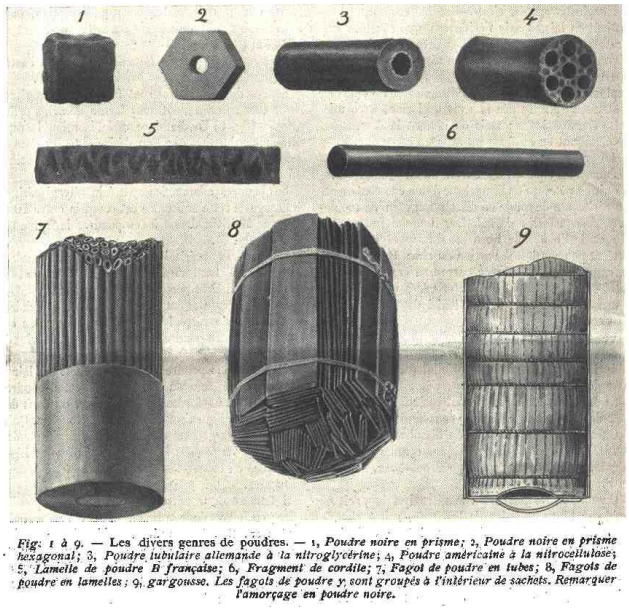
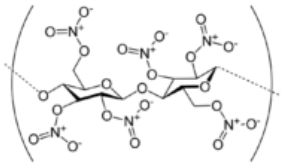
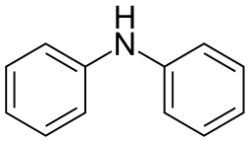


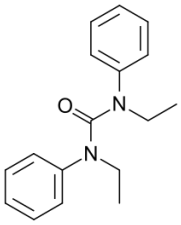
Figure 33 : (i) Différents conditionnements de la nitrocellulose (à gauche)[206]. (ii) Fagots de nitrocellulose Cordite allemande acheminés par des artilleurs britanniques sur un terrain de brûlage en vue de leur destruction (à droite) à proximité de Cologne, Allemagne. 1919[207].



Nitrocellulose (CAS : 9004-70-0)



Diphénylamine (CAS : 122-39-4)



Ethyl centralite (Centralite 1, N,N'-Diethyl-N,N'-Diphenylurée (CAS :85-98-3)

Figure 34 : Formules structurales de la nitrocellulose, de la diphénylamine et de l'ethyl Centralite (Centralite 1).

La *Poudre B* sans fumée était désignée par *Poudre BN3F* durant la Grande Guerre. La nitrocellulose fut conditionnée sous forme de plaquettes, baguettes, tiges tubulaires, libres ou solidarisées en fagots (cf. Figure 33), de paillettes dans les cartouches, gargousses des charges propulsives. D'autres composés énergétiques furent adjoints à la nitrocellulose pour accroître sa puissance (ergols double base) comme la nitroglycérine, les dinitrotoluènes (Allemagne).

Les britanniques utilisèrent trois formulations de poudres propulsives dont la *Cordite* (due au chimiste Abel) composée de 65% de nitrocellulose dissous dans 30% de nitroglycérine, additionnée de 5% de vaseline[208], la *NCT*[209] et la *Balistite*[210].

---

[206] *La Nature,* N°2004 - 21 octobre 1911 *« Les poudres et la catastrophe du cuirassé « Liberté» »,* par Denis Blaizot. https://sciences.gloubik.info/spip.php?Article283.

[207] Imperial War Museum. The disarmament of the german army, 1919-1923, 26 avril 1919, Brooke, John Warwick (Lieutenant) (photographe), number Q 7563.

[208] Henry De Varigny (1916). *Explosions et explosifs*, *op cit.* p. 63.

[209] Nitrocellulose tubulaire.

[210] Nitrocellulose / nitroglycérine.

3.2.4 Chargement des bombes d'aviation

L'hexanitrodiphénylamine, est une matière colorante jaune (jaune Aurantia) qui fut trouvée dans des bombes d'aviation allemandes mélangée au trinitrotoluène. Les bombes d'aviation allemandes furent chargées avec des explosifs similaires à ceux des projectiles de tranchée. Les bombes « bricolées » dérivées de projectiles d'artillerie par l'adjonction d'un empennage étaient chargées d'explosifs en vigueur dans l'Artillerie. Les bombes britanniques (comme celles de 16, 20, 65, 100 livres, etc.) étaient chargées par de la *Tolite* (TNT) ou des *Amatols* avec des nitrates d'ammonium et du TNT en proportions relatives variables (*Amatol 80 / 20, 60 / 40*) avec une charge de détonateur de *Tetryl*[211] (tétranitrométhylaniline, connue en Allemagne sous le nom de Tétryl, et en France, sous le nom de *Pyronite*). Les explosifs utilisés durant la Première Guerre mondiale étaient tous des solides à l'exception de la *Panclastite* de certaines bombes d'aviation françaises, qui était un liquide d'une grande puissance, composé de peroxyde d'azote et d'un combustible liquide (sulfure de carbone, le nitrotoluène, le nitrobenzène, le benzène, le pétrole, les essences de pétrole, etc.). Des explosifs perchlorates comme l'*Explosif 90 / 10* auraient aussi été employés au chargement de bombes par l'aviation française[212].

3.2.5 Composition des explosifs des fourneaux offensifs et défensifs de la guerre de mines

Avec la guerre de siège qui s'installa avec la cristallisation du front occidental dès fin 1914, d'anciennes pratiques obsidionales furent remises au goût du jour pour espérer briser sur certains secteurs clés, jugés stratégiques, le front, faute, avant 1917, de moyens d'artillerie lourde suffisamment puissants.

Une guerre souterraine visant à détruire les fortifications de circonstances adverses par le dessous fut menée (cf. Section 3h du présent manuscrit). De grandes quantités d'explosifs étaient requises pour mener à bien cette entreprise. La puissance et la masse des charges (dénommées « fourneaux ») augmentèrent significativement durant la guerre avec l'approfondissement progressif des chantiers souterrains offensifs, passant de quelques dizaines de kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes (accroissement d'un facteur 1 000).

Les Allemands utilisèrent une gamme d'explosifs très variés, principalement nitratés et nitrés, des explosifs de sureté dérivés de ceux employés par l'industrie civile dans les mines et carrières. Les Britanniques chargèrent leurs fourneaux de mine principalement avec l'*Ammonal*. Les Français utilisèrent principalement dès fin 1914 des explosifs chlorates dont ils disposaient à foison.

Le Tableau 4 présente les explosifs utilisés par les Français, les Britanniques et les Allemands pour la confection des fourneaux de guerre de mines durant la Première Guerre mondiale.

---

[211] Belot, H. *Principale bombes britanniques de la Première Guerre mondiale et des années 20, périmées en 1940.* Communication personnelle. Non publié.

[212] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 5 N 266-03. Maurin, Lieutenant Colonel (1915). Ministère de la Guerre. Notion succinte sur les explosifs employés à l'usage de la guerre, *op. cit*. p. 19.

Section 1h
Chargement et compositions des engins de guerre.

Français	Composition	Observation
Cheddite et explosifs chloratés	$NaClO_3$ + paraffine	/
Mélinite	A base de 2,4,6-trinitrophénol	Abandonnée dès fin 1914, réservé pour détonateurs et pétards
Dynamite gomme	Trinitroglycérine stabilisée	/
Astralite	68-85 % nitrate d'ammonium, 7-27 % TNT + DNT et nombreux autres composés organiques additionnels	Explosif de sureté
Poudre noire	KNO_3 + charbon de bois + soufre	Principalement pour les camouflets
Britanniques	**Composition**	**Observation**
Nitrocellulose	Nitrocellulose	Uniquement en 1915
Ammonal	TNT + nitrate d'ammonium + Al° en poudre	/
Amatol	TNT + nitrate d'ammonium	/
Sabulite	Nitrate d'ammonium 51 %, perchlorate d'ammonium 10 %, TNT 15 %, NaCl 24 %	/
Poudre noire	KNO_3 + charbon de bois + soufre	/
Gelignite	Coton + collodion dissous dans de la nitroglycérine ou du nitroglycol et mélangé avec de la pâte à papier et du salpêtre (KNO_3)	/
Cordite	Nitrocellulose gélifiée + nitroglycérine	/
Lyddite	A base de *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol)	/

Allemagne	Composition	Observation
Ammonal	TNT + nitrate d'ammonium + Al° en poudre	/
Air comprimé	Air	/
Westfalite	90 % nitrate d'ammonium, nitrate de potassium, et composés organiques	/
Aldorfite	81 % nitrate d'ammonium, 17 % TNT et 2 % composés additionnels	/
Donarite	55-84 % nitrate d'ammonium avec jusqu'à 22 % de nitroglycols et 11-16 % TNT + DNT	/
Astralite	68-85 % nitrate d'ammonium et 7-27 % TNT + DNT avec composés organiques additionnels	Explosif de sureté
Pikrite	*Mélinite*, Sp 88, 2,4,6-trinitrophénol	/
Poudre noire	KNO_3 + charbon de bois + soufre	/
Perdite	72 % nitrate d'ammonium, 10 % perchlorate de potassium , 3 % sciure de bois, 15 % DNT + TNT	/
Dynamite	Trinitroglycérine stabilisée	/
Ekrasite	72 % nitrate d'ammonium, 15 % d'acide picrique, 10 % perchlorate de potassium, 3 % farine	/
Dynamon	90-95 %nitrate d'ammonium et 5-10 % de charbon de bois	/
Explosifs chlorates	A base de K, Na ClO_3	/
Romperite	86 % nitrate d'ammonium, 8-10 % nitroglycérine et nitroglycols, avec TNT et Al° pulvérulent	Explosif de sureté
Poudre explosive	Mélange de poudre noire et de nitrate d'ammonium	/
Nitrocellulose	Nitrocellulose	/

Tableau 4 : Explosifs communément employés dans la confection des charges souterraines de la guerre de mines par les Allemands, Français et Britanniques[213].

3.2.6 Chargements spéciaux

Les chargements spéciaux étaient ceux des projectiles incendiaires, fumigènes, éclairants ou chimiques et des projectiles à balles.

Chargements des projectiles à balles et mitraille

Ces projectiles utilisés dès le début des hostilités durant la Première Guerre mondiale étaient constitués (i) d'un chargement de plus d'une centaine de billes centimétriques en plomb (Pb) (durcit par l'antimoine (Sb)), incorporées dans une résine, (ii) d'une charge de propulsion dans l'axe central et/ou au culot (désignée par charge arrière), formée de poudre noire (à base de KNO_3). Les anciens champs de bataille recèlent de nombreux caffûts d'obus à balles, car une fois ayant projeté leur contenu, les enveloppes métalliques, retombèrent intègres. De nombreuses billes peuvent aussi être collectées dans les sols sur les zones bombardées.

[213] D'après Willig, D. Rose, E., Heyse, I., Allermeier, C., Doyle, P. (2015). *Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiserführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Heft 4*, p. 123. D'après Angetter (2004). Angetter & Schramm (2013). Anonymous (1911). Buchner (1982). Ecole des Mines (1879). Gowland & Truscott (1919). Heinen (2000). Kommandeur Der Pionniere 326 (1917) Kranz (1935a). Kranz (1936). Ministère de la Guerre (1915). Schrimpff (1916).

Chargements chimiques

L'artillerie chimique s'était développée à l'échelle opérationnelle dès 1915 après que les différents belligérants aient pris consciences des limites, voire des risques, des attaques chimiques par vagues dérivantes, inaugurées par l'offensive allemande au chlore gazeux Cl_2 (gaz désigné en France sous le nom de *Bertholite*) dans un secteur stratégique, à Langemark près d'Ypres, Flandre occidentale, Belgique, le 22 avril 1915. L'artillerie chimique prit son essor car elle permettait de vectoriser à distance les agents chimiques directement au cœur du dispositif défensif adverse sans risque d'exposer son propre camp à leurs effets délétères, comme pour les vagues dérivantes, suite au changement de direction des vents et/ou à des modifications indésirables et intempestives des conditions météorologiques.

Les compositions des agents chimiques toxiques de guerre étaient d'une très grande diversité et évoluèrent durant la guerre pour accentuer leur agressivité, leur persistance, et leur discrétion.

Des recherches scientifiques furent menées durant la guerre par les chimistes de toutes les parties belligérantes afin d'optimiser la dispersion des toxiques à l'impact, d'accroître leur persistance, leur discrétion et leur agressivité et de surpasser les capacités des protections respiratoires de l'adversaire.

Les toxiques de guerre étaient majoritairement des liquides (le qualificatif de « guerre des gaz » est un abus de langage car seuls le phosgène et l'acide cyanhydrique étaient gazeux, et les arsines des projectiles allemands à *Croix bleue* étaient solides), classés selon l'effet escompté ou selon leurs modalités de dispersion et leur persistance recherchés sur le terrain. On distingue ainsi les :

i) **Agents fugaces**, volatils ou rapidement hydrolysés par l'humidité de l'air, ou par la pluie. Exemples : le phosgène (*Collongite*), l'acide cyanhydrique (*Forestite*), les arsines, etc. ;

ii) **Agents persistants**, qui peuvent se maintenir plusieurs jours, et même plusieurs semaines, en activité sur le terrain. Exemples: certains lacrymogènes (bromure de benzyle ou *Cyclite*), l'*Ypérite* (sulfure d'éthyle dichloré), la chloropicrine (chloroforme nitré, trichloronitrométhane, *Aquinite*). etc.

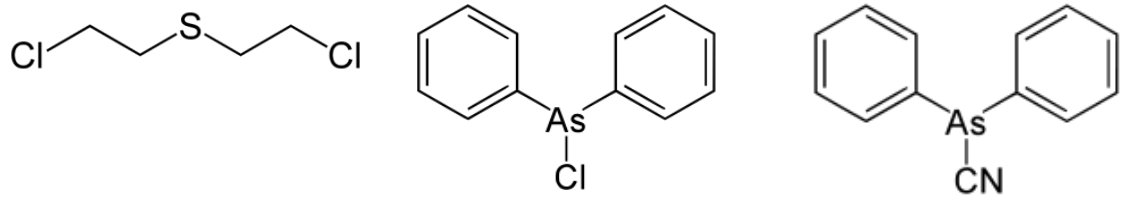
Certains agents persistants peuvent devenir fugaces selon le mode de dispersion utilisé. L'intoxication à l'*Ypérite* se caractérisait avant tout par un intervalle de plusieurs heures, exempt de symptômes. Ces derniers s'intensifièrent ensuite lentement, et le maximum de leurs effets se fit sentir deux à trois jours après l'exposition. Les effets différés de l'*Ypérite* et du phosgène étaient d'une redoutable efficacité. Selon leurs effets, on classe les toxiques de guerre de la manière suivante :

- Les vésicants,
- Les suffocants,
- Les irritants lacrymogènes,
- Les irritants sternutatoires,
- Les toxiques cellulaires.

L'arsenal chimique, dominé lors du début de la guerre par les projectiles lacrymogènes (dès 1915) progressivement se « toxifia » par l'usage d'agents toujours plus agressifs et sournois, car discrets à l'exposition mais aux effets différés. Aux chargements suffocants (comme ceux à base de phosgène ($COCl_2$, désigné côté français par *Collongite*, un oxychlorure de carbone, chlorure de carbonyle), ou encore de diphosgène (Cl-COOC Cl_3, chloroformiate de méthyle trichloré désigné côté français par *Surpalite*), s'associèrent dès 1917 les vésicants / suffocants avec

notamment le plus connu et resté dans la mémoire collective emblématique de la guerre chimique, le mal nommé, « gaz moutarde » ou *Ypérite*[214] (cf. Figure 35) (s'agissant d'un liquide visqueux) répondant à la formule de sulfure d'éthyle dichloré $S(CH_2CH_2Cl)_2$), puis, et dès septembre 1917 par des émétisant / sternutatoires puissants (avec les arsines, *Clark I* (chlorure de diphénylarsine) et *Clark II* (cyanure de diphénylarsine de formules respectives $(C_6H_5)_2$-$AsCl_2$) et $(C_6H_5)_2$-$AsCN_2$)) (cf. Figure 35).

Les diphénylarsines chargèrent les projectiles allemands de 77, 105, 155 et 210 mm dits à *Croix bleue*. Il n'y avait pas d'équivalent côté français et allié. Les obus allemands à *Croix bleue* étaient les seuls projectiles chimiques de la Première Guerre mondiale à chargement solide. Les arsines, une fois dispersées, formaient dans l'air de fins aérosols qui possédaient la propriété de traverser les protections respiratoires (masques) et de produire, une fois respirés, des effets lacrymogènes, sternutatoires et émétisants forçant le combattant à retirer son masque à gaz. Il était ainsi exposé aux agents suffocants qui étaient tirés en même temps lors des *Feuerwalze,* tactiques de l'artillerie allemande dès 1917 basée sur une combinaison savante de tirs de projectiles chimiques divers et explosifs (*Buntkreuzschiessen*[215]) lors de bombardements intenses sur des objectifs ciblés.



Sulfure d'éthyle dichloré (ypérite ou « gaz moutarde » (CAS : 505-60-2).

Diphénylchlorarsine (CAS : 712-48-1) Clark 1.

Diphénylcyanoarsine (CAS : 23525-22-6) Clark 2.

Figure 35 : Formules structurales de l'Ypérite, de la diphénylchlorarsine et de la diphénylcyanoarsine.

Pendant la Première Guerre mondiale, des mélanges d'agents chimiques furent également employés, comme le *Winter-Lost* (littéralement « *Ypérite* d'hiver ») : *Ypérite* au soufre, mélangé à la *Marsite* (trichlorarsine, $AsCl_3$), phényl dichloroarsine + diphénylchloroarsine et triphénylarsine. Les Britanniques mirent en œuvre des mélanges de dichlore et de phosgène connu sous le nom de *White star*. D'autres mélanges furent testés comme dichlore + *Chloropicrine* (*Yellow Star*), acide sulfurique + *Chloropicrine* (*Green Star*), sans succès.

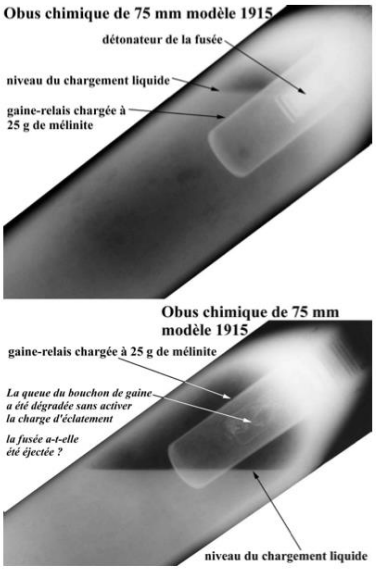
Les munitions chimiques étaient pour l'essentiel des projectiles explosifs standards adaptés au chargement spécial. Les Britanniques furent les seuls à développer un obus (dit « à double diaphragme », comme l'obus de 114 mm chargé de chloropicrine) spécifiquement conçu pour la guerre chimique.

Sur les projectiles standards allemands, un marquage à la peinture et une signalétique spécifique permettaient d'identifier les chargements et leur fonction en les distinguant des projectiles explosifs. Les fusées allemandes marquées d'une croix frappée à froid étaient spécifiques aux obus chimiques à chargement liquide[216] (comme l'*Ypérite*, la chloropicrine, etc.).

[214] Utilisée pour la première fois par l'artillerie allemande à Nieuport, Belgique en 1917.

[215] Bombardements aux croix multicolores.

[216] La croix indique le scellement de la fusée au corps du projectile par un joint de ciment magnésien.



Les projectiles de l'artillerie chimique étaient en résumé de simples réservoirs métalliques, formés par l'enveloppe du projectile (*casing*) et dotés d'une faible charge explosive destinée à ouvrir le réservoir (cf. Figure 37) et à en disperser le contenu autour du point d'impact.

La puissance de la charge (comme celle de la gaine – relai de l'obus chimique français de 75 mm, cf. Figure 36 ci-contre) était savamment dosée afin d'assurer une dispersion optimale tout en garantissant sur le terrain bombardé une concentration de l'agent chimique dans ses limites d'effets toxiques. Les chargements liquides agressifs étaient généralement conditionnés dans des réservoirs, notamment en plomb, pour protéger l'acier ou la fonte des intrados des *casings* des projectiles contre la corrosion par les chargements chimiques agressifs à tendance acide.

Figure 36 : Radiographie de deux obus chimiques français de 75 mm à chargement liquide de la Première Guerre mondiale montrant la gaine d'éclatement en place à l'œil et l'espace de tête laissé vide à l'ogive[217].

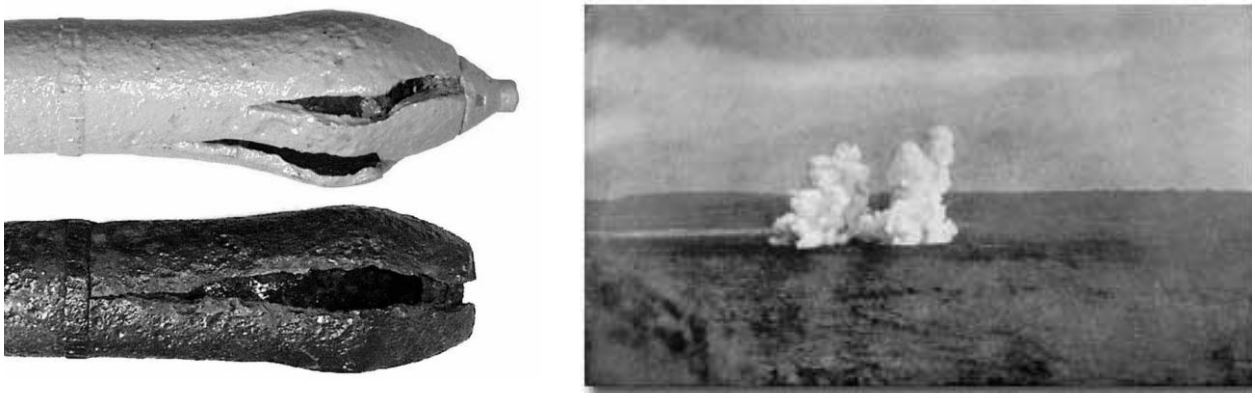


Figure 37: Obus chimiques français de 75 mm modèles 1900 et 1915 après fonctionnement (à gauche[218]) et éclatement de projectiles chimiques (à droite[219]).

[217] Belot, H. Communication personnelle. Non publié.

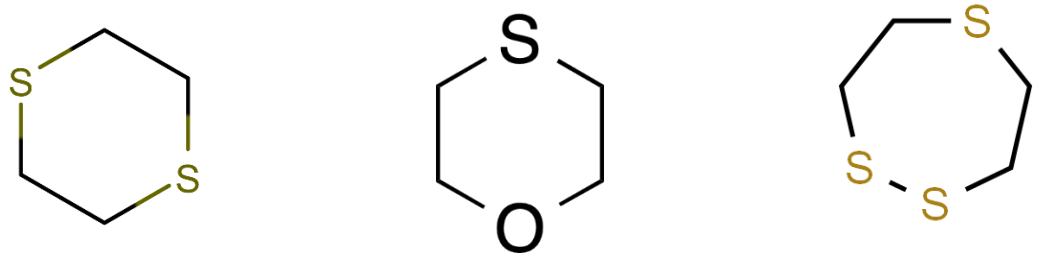
[218] *Ibid.*

[219] Germany's Use of Chemical Warfare in World War I. https://www.firstworldwar.com/features/chemical_warfare.htm

L'*Adamsite* (diphénylaminechlorarsine, vomitif) et les *Lewisites* (2-chlorovinyldichlorarsine, vésicants), bien que développés par les Alliés à la fin de la Première Guerre mondiale, n'ont pas pu être mis en œuvre à temps de façon opérationnelle avant la cessation des hostilités.

Certains agents chimiques particulièrement visqueux, comme l'*Ypérite*, étaient solubilisés / fluidisés dans des solvants organiques (tétrachlorure de méthane CCl_4, chlorobenzène C_6H_5Cl, etc.) et/ou associés à des agents fumigènes. La fluidisation des agents toxiques dans des solvants garantissait une bien meilleure dispersion des gouttelettes toxiques autour du point d'impact.

Enfin, l'*Ypérite* industrielle renfermait de nombreuses impuretés soufrées cycliques, stables et persistants, appartenant à la famille des thianes (cf. Figure 38), à l'origine de l'odeur alliacée de toxique de guerre[220].



1,4-dithiane ($C_4H_8S_2$) CAS 505-29-3 | 1,4-oxathiane (C_4H_8OS) CAS 15980-15-1 | 1,2,5-Trithiepane ($C_4H_8S_3$) CAS 6576-93-8 2.34

Figure 38 : Formules structurale de quelques thianes rencontrées en impuretés dans les Ypérites.

Chargements incendiaires et fumigènes

La Première Guerre mondiale a vu la systématisation de l'usage des projectiles d'artillerie à chargement incendiaire. Des projectiles de ce type furent spécialement développés puis mis en œuvre pour les contre-mesures anti-Zeppelin par les Alliés pour détruire les dirigeables gonflés à l'hydrogène, un gaz hautement inflammable. Le phosphore blanc, qui s'enflamme spontanément au contact de l'air, quasiment impossible à éteindre, constituait la base de ces chargements. La combustion très énergique du phosphore blanc, présentait aussi un avantage majeur : elle produisait du pentoxyde de phosphore, formant une fumée blanche, épaisse, agissant comme un fumigène. Les obus désignés par n°2 et n°3 de 75 mm de l'Armée française furent conçus pour mêler les effets incendiaires aux effets toxiques. L'obus n° 2 était un obus incendiaire-suffocant composé de phosphore et de sulfure de carbone, l'obus spécial n°3 était quant à lui un obus incendiaire-fumigène chargé uniquement de phosphore. Les projectiles allemands traçants étaient dotés au culot de pastilles inflammables à base de minium Pb_3O_4.

Les agents fumigènes permettaient aux artilleurs de visualiser et localiser de loin le point d'impact pour régler / ajuster le tir. Les générateurs de fumée allemands étaient des dispositifs destinés à réaliser et entretenir des nappes basses de grande surface, capables de masquer des mouvements de troupes ou des installations.

[220] Chmielinska, K., Hube, D., Bausinger, T., Simon, M., Riviere, G., Fauser, P., & Sanderson, H. (2019). *Environmental contamination with persistent cyclic mustard gas impurities and transformation products. Global Security: Health, Science & Policy* – An Open Access Journal, 4(1). 14-23. https://doi.org/10.1080/23779497.2019.1699848

Les agents fumigènes étaient couramment ajoutés aux chargements toxiques, dont l'ouverture à l'impact n'aurait produit sans ces adjuvants que trop peu de fumée pour être perçue de loin par les artilleurs. Il s'agit notamment de tétrachlorure d'étain (*Opacite*, de formule $SnCl_4$), de titane ($TiCl_4$) ou encore de trichlorure d'arsenic (*Marsite,* de formule $AsCl_3$). Le tétrachlorure stannique est un liquide incolore encore connu sous le nom de « liqueur fumante de Libavius [221]» qui réagit au contact de l'air humide en formant des fumées de chlorure d'hydrogène, des fumées d'autant plus épaisses que l'air est humide.

Les générateurs de fumée allemands se composaient d'un récipient contenant de l'acide chlorosulfonique[222], et d'un autre renfermant des morceaux de chaux vive. La production de fumée (formée de microscopiques gouttelettes d'acides sulfurique et chlorhydrique en suspension dans l'air) s'effectue selon la réaction $Cl.SO_3H + H_2O \rightarrow HCl + H_2SO_4$. Enfin, certaines munitions allemandes (comme la munition explosive de 100 mm « S ») étaient dotées au culot d'un réservoir en fer blanc, calé par un ciment magnésien et renfermant du trioxyde de soufre SO_3[223].

3.2.7 Composition des éléments constitutifs des engins de guerre (hors chargement)

Si le chargement des engins de guerre est constitué d'éléments et de composés chimiques aux propriétés délétères susceptibles d'avoir été introduits dans l'environnement, certaines parties constitutives des enveloppes (ou *casing*) des projectiles pouvaient l'être aussi. Cette recherche environnementale et historique ne pouvait faire l'impasse sur cette dimension potentiellement polluante des obus et autres engins de guerre de 1914-1918.

Corps des projectiles

Les munitions étaient principalement constituées d'une enveloppe (*casing*) faite d'acier ou de fonte aciérée. Chimiquement, il s'agissait d'alliages fer-carbone, avec, en général, un pourcentage de carbone inférieur à 1,7 pour les aciers utilisés majoritairement pour les corps d'obus, et compris entre 1,7 et 6,7 pour les fontes. D'un point de vue physique les deux se dissociaient par leur magnétisme (amagnétique pour la fonte). Ces alliages pouvaient renfermer jusqu'à 1,5% en manganèse (projectiles allemands).

Les obus étaient sertis d'une ou de plusieurs ceintures de guidage constituées soit de cuivre, soit de zinc, des métaux mous qui, au moment du tir, pouvaient s'insérer dans les rayures hélicoïdales de l'âme des canons (tube). Certains obus explosifs chargés de *Mélinite* (qui est un acide) étaient étamés (apposition d'une fine pellicule d'étain, Sn) à l'intrados pour éviter l'attaque de l'acier par l'explosif et la formation de picrates de fer particulièrement instables et sujets aux détonations spontanées. L'intrados était parfois serti de verre pour protéger l'acier de la corrosion par les acides. Enfin, certains projectiles de l'artillerie chimique (à chargement non conventionnel) étaient dotés de réservoir en plomb renfermant des liquides agressifs et corrosifs pour le fer (comme certains agents lacrymogènes bromés ou iodés).

---

[221] La première mention du chlorure d'étain apparaît en 1605 chez Andreas Libavius dans Spiritus fumans Libavii.

[222] Liquide incolore très corrosif de densité 1,78 et de point d'ébullition 158°C, dont la formulation chimique s'écrit : $ClHSO_3$.

[223] Preuss, J., Eitelberg, F., Dehner, U., Albrecht, G., Laskowski, S. (2000), *op. cit*. p. 42.

Les fusées, amorces et gaines-relais (gaines d'éclatement)

Les fusées d'artillerie étaient traditionnellement constituées de métaux non ferreux, comme le laiton (alliage de cuivre (Cu) et de zinc (Zn). Cu_3Zn_2), le bronze (alliage de cuivre (Cu) et étain (Sn)) ou encore d'aluminium (Al). Il s'agissait en effet de métaux sûrs, ne générant aucune étincelle. Toutefois, durant la Première Guerre mondiale la composition des fusées évolua, notamment celles dotant l'Artillerie allemande. Le sous-sol de l'Allemagne était pauvre en métaux non ferreux et l'importation de ces derniers fut rendue stoppée suite au blocus imposé par la marine britannique. Les métaux non ferreux « nobles » comme le laiton venant à manquer et réservés à la confection des cartouches et étuis, furent progressivement remplacés dans les fusées par des alliages de moindre qualité comme ceux à base de cuivre, zinc impur (riche en cadmium) s'oxydant rapidement en se patinant de gris. Puis, pour limiter encore la consommation des métaux non ferreux, des plateaux d'acier furent intercalés entre ceux à base d'alliage Cu / Zn / Cd. Ces « fusées à plateaux » d'acier étaient typiques de la fin de la guerre. Les alliages de cinq fusées d'artillerie allemandes constituées de l'alliage gris Cu / Zn / Cd, collectées sur le terrain, ont été analysés au laboratoire par ICP / MS après dissolution à l'eau régale. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 qui suit :

Fusées	**Teneur ($mg.kg^{-1}$)**					
Elément	**Zn**	**Cd**	**Cu**	**Hg**	**In**	**As**
F1	502387	895	2983	1,71	9,45	78
EKZ16-1	500705	854	13530	0,11	20,5	63
EKZ16-2	179638	989	21690	1,42	8,19	<20
EKZ16-3	490561	1507	24950	0,34	0,42	48
F2	426131	1189	24820	0,55	9,34	81

Tableau 5 : Résultat analytique sur des alliages de fusées allemandes constituées d'alliages Zn Cu[224].

Ces résultats montrent la présence systématique de fortes teneurs en cadmium (Cd) et en moindre mesure d'indium (In) et d'arsenic (As) dans l'alliage ZnCu sans qu'il y ait une corrélation significative entre les teneurs en Zn, et celles en Cd et In. Ces deux derniers éléments sont réputés être des impuretés sulfurées présente dans la sphalérite (ZnS), le principal minerai de zinc. Les variations des teneurs en Cd dans les alliages constitutifs des fusées allemandes de la fin de la guerre reflètent vraisemblablement celles, naturelles, rencontrées dans les gisements de zinc exploités par l'Allemagne durant la Première Guerre mondiale (cf. Figure 39).

Des corrélations remarquable, proches de [Zn] ($mg.kg^{-1}$ MS) = 1 000 [Cd] ($mg.kg^{-1}$ MS) ont été mises en évidence dans le cadre de cette recherche dans les sols et des résidus de brûlage de munitions et fusées d'artillerie allemande, en Meuse et dans le département du Nord (cf. Section 3e du présent manuscrit). Ce marquage remarquable des sols dérive de la composition des alliages constitutifs des fusées allemandes neutralisées.

[224] Hubé, D. (2017). Laboratoire du BRGM.

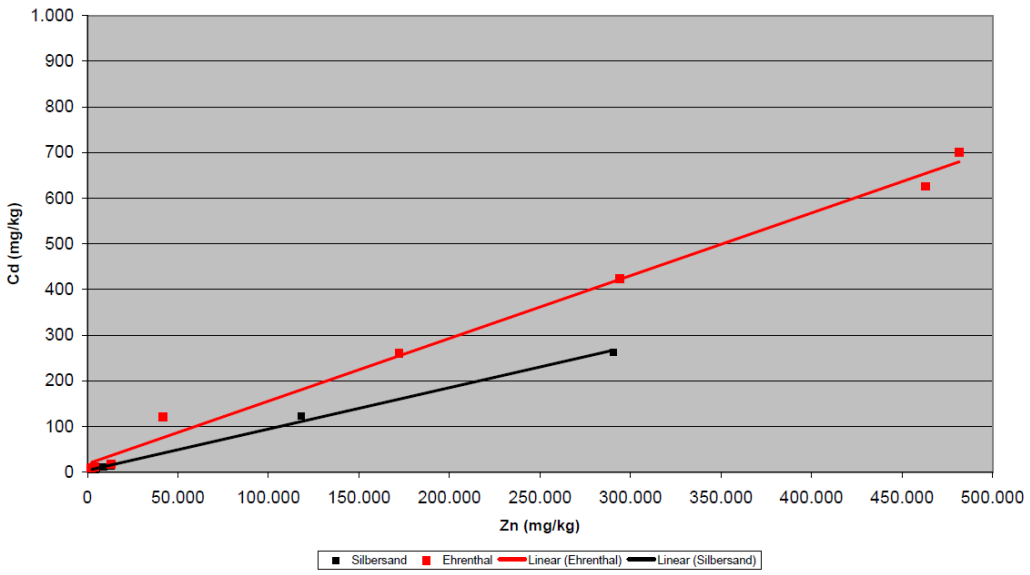


Figure 39 : Corrélations entre teneurs en zinc et teneurs en cadmium des minerais de zinc de gisements allemands exploités durant la Première Guerre mondiale[225].

Les fusées percutantes allemandes étaient actionnées par une amorce formée d'un petit cylindre de cuivre renfermant un explosif primaire sensible et puissant composés de 30 % de fulminate de mercure ($Hg(CNO)_2$), 50 % de chlorate de potassium ($KClO_3$) et de 20 % sulfure d'antimoine (SbS)[226]. Des amorces à base d'azoture de plomb ($Pb(N_3)_2$) étaient également utilisées. L'obus allemand d'artillerie de campagne de 77 mm de semi rupture était ainsi dotée d'une fusée possédant une gaine détonateur chargée d'acide picrique (*Mélinite*) pur et tassé (*Grf88, Granatfüllung 88*) ou encore de fulminate de mercure pur, de fulminate mélangé à du chlorate de potassium, ou de « charges mixtes » constituées de TNT (2,4,6-trinitrotoluène) ou de *Tétryl* (tétranitrométhylaniline) recouverts d'une couche de fulminate de mercure ou d'azoture de plomb[227]. Enfin, la charge explosive de certains modèles de détonateurs comprenait une couche de fulminate de mercure et de poudre noire[228]. Les gaines et capsules relais en acier étaient généralement chargées de *Mélinite*.

Cartouches et étuis

Les cartouches étaient constituées de laiton, un alliage de cuivre (Cu) et de zinc (Zn)). Le culot des cartouches de projectiles d'artillerie était doté d'une amorce constitué d'environ un gramme de fulminate de mercure ($Hg(CNO)_2$).

[225] Bausinger, T. Communication personnelle. Non publié.

[226] *Artillerie allemande. Les fusées*, *op. cit*. p. 86.

[227] *Ibid.*

[228] *Ibid*, p. 87.

3.2.8 Estimatif des quantités de poudres et explosifs produites et/ou utilisées.

Un glissement d'une approche qualitative à celle qualitative

Dresser un catalogue des constituants des matériels et matières explosibles et agressives employées durant la Grande Guerre, dans la perspective d'en évaluer les impacts potentiels ou avérés sur l'environnement n'a de sens que si cette approche qualitative se couple à approche quantitative. La dégradation d'un milieu naturel par des composés chimiques d'origine anthropique est dépendante (i) des propriétés intrinsèques des composés en question, (ii) des environnements hydrogéologiques dans lesquels ils ont été introduits, (iii) des conditions physico-chimiques et microbiologiques dans lesquelles ils évoluent spatialement et temporellement, et (iii) des masses introduites. Ce dernier point me parait essentiel pour distinguer des substances, peut être très dangereuses, mais d'usage anecdotique, de celle massivement utilisées et pouvant significativement dégrader l'environnement. Ce travail s'appuie en grande partie sur les recherches remarquables, malheureusement non publiées de Bausinger, T. (2011) *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*. Universität J. Gutenberg, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut, Mainz, 2011. Modifié. Non publié.

Côté français

En ne considérant que la situation de la production française, il peut être établi les bilans de la production des poudres et explosifs durant cette période (cf. Tableau 6 ci-dessous).

Produit	Composition	Usages	**Tonnage produit et importé** (déduit des productions moyennes journalières)	**Tonnage utilisé et exporté (191914-1918)**
Poudre B, coton-poudre	Nitrocellulose ± nitroglycérine	Propulseurs dans les étuis des munitions. Dynamite dans certaines mines.	377 800	445 845
Explosifs (per)chlorates	$KClO_3$, $KClO_4$, NH_4ClO_4, avec matrice paraffinée et éventuellement $NaNO_3$	Grenades, artillerie de tranchée et mines souterraines	111 500	130 905
Acide picrique (*Mélinite*)	2,4,6-Trinitrophénol	Explosifs binaires / ternaire (avec TNT et nitronaphtalènes). pétards, amorces	505 700 (explosifs azotés)	306 300
Schneiderite	Nitrates d'ammonium + nitronaphtalènes + TNT.	Explosifs de munitions d'artillerie		135 700
Autres explosifs azotés	TNT (*Tolite*). nitrobenzènes, *Crésylite*, etc.	Explosifs de munitions d'artillerie		84 849
TOTAL	**-**	**-**	**-**	**1 103 599**

Tableau 6 : Production et importation de poudres et d'explosifs en France durant la Première Guerre mondiale [229].

[229] Tissier, L. (1926). « Les poudres et explosifs ». In Gerard, J. (Hrsg.). *Chimie et industrie. Dix ans d´efforts scientifiques et industriels et colonial*. Bd. 1. Paris: Chimie et Industrie: 1320-1345, cité dans Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*. Universität J. Gutenberg, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut, Mainz, 2011. Modifié. Communication personnelle. Non publié. p. 24.

D'après Tissier (1926), la quantité totale de poudres et d'explosifs produite et importée en France durant la Première Guerre mondiale s'élevait à environ 1 103 600 tonnes, dont environ 70% étaient constitués par la *Mélinite* et les poudres propulsives nitrocellulosiques. Les livraisons en explosifs azotés aux armées culminèrent en juillet 1917 vers en moyenne 750 tonnes / jour (~ 5 500 tonnes par mois) (cf. Figure 40). La production française s'était principalement concentrée sur celle de la *Mélinite* comme le met en exergue le Tableau 7 ci-dessous. Un peu moins de 20% des NAC entrant dans la composition des explosifs français en dotation dans les armées en France durant la Grande Guerre furent importés des Etats-Unis.

Composé	Quantités (tonnes)	Provenance	Pourcentage
Acide picrique (*Mélinite*)	236 545	France	57,1%
Acide picrique (*Mélinite*)	69 755	USA	16,8%
Trinitrotoluène (TNT, *Tolite*)	39 735	France	9,6%
Trinitrotoluène (TNT, *Tolite*)	4 514	USA	1,1%
Dinitronaphthalène (DNN)	23 000	France	5,6%
Dinitrophénol (DNP)	21 000	France	5,1%
Mononitronaphthalène (MNN)	19 600	France	4,7%
TOTAL	**414 149**	-	100,0%

Tableau 7 : Provenance des explosifs nitrés disponibles en France pour les armées durant la Première Guerre mondiale[230].

D'après Tissier (1926)[231], la quantité d'explosifs (per)chloratés consommée et exportée par la France durant la Première Guerre mondiale s'élèverait à 130 905 tonnes. D'après les statistiques et le suivi des consommations des poudres, explosifs, toxiques de guerre et munitions établies au pas de temps décadaire [232], si on se base sur les quantités moyennes journalières d'explosifs (per)chloratés livrées aux armées, le tonnage livré durant la Grande Guerre avoisineraient les 111 500 tonnes (cf. Figure 41).

L'Italie a également livré à la France des sels de chlorate et perchlorate. La livraison d'explosifs (per)chloratés culmina fin 1916 (octobre, novembre) avec 180 tonnes / jour (cf. Figure 41), (soit 25% du tonnage du tonnage maximum en explosifs azotés produits + importés), puis déclina ensuite, une décroissance jalonnée par des pics coïncidant aux grandes offensives. En 1918, avec la reprise de la guerre de mouvement, les livraisons retrouvèrent les niveaux de 1915, comprises entre 20 et 40 tonnes / jour. Les tonnages respectifs des différentes formulations d'explosifs chloratés et perchloratés ne sont pas renseignés dans les archives consultées dans le cadre de cette présente recherche.

[230] Tissier, L. (1926). *Les poudres et explosifs*, *op. cit.* p. 25.

[231] *Ibid.* p.24.

[232] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28. Statistiques : graphiques des productions de matériels et munitions ; de la production et des importations de poudres, explosifs, produits chimiques de guerre, fontes et aciers ; de la consommation et des stocks de munitions ; des accidents de tir de 75 (registre d'Albert Thomas). 1914-1918.

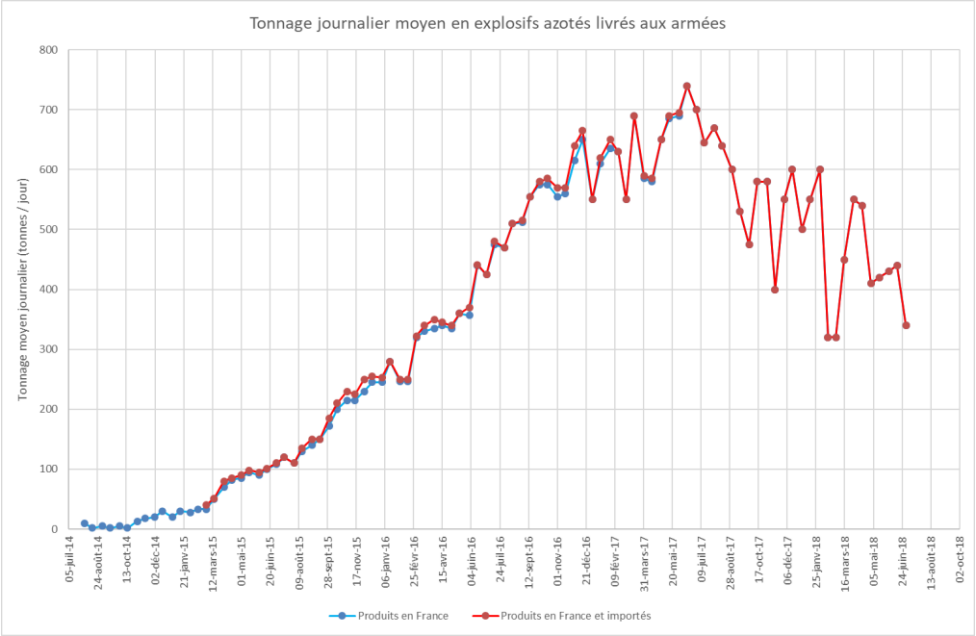


Figure 40 : Evolution (1914-1918) des tonnages journaliers moyens en explosifs azotés livrés aux armées en France[233].

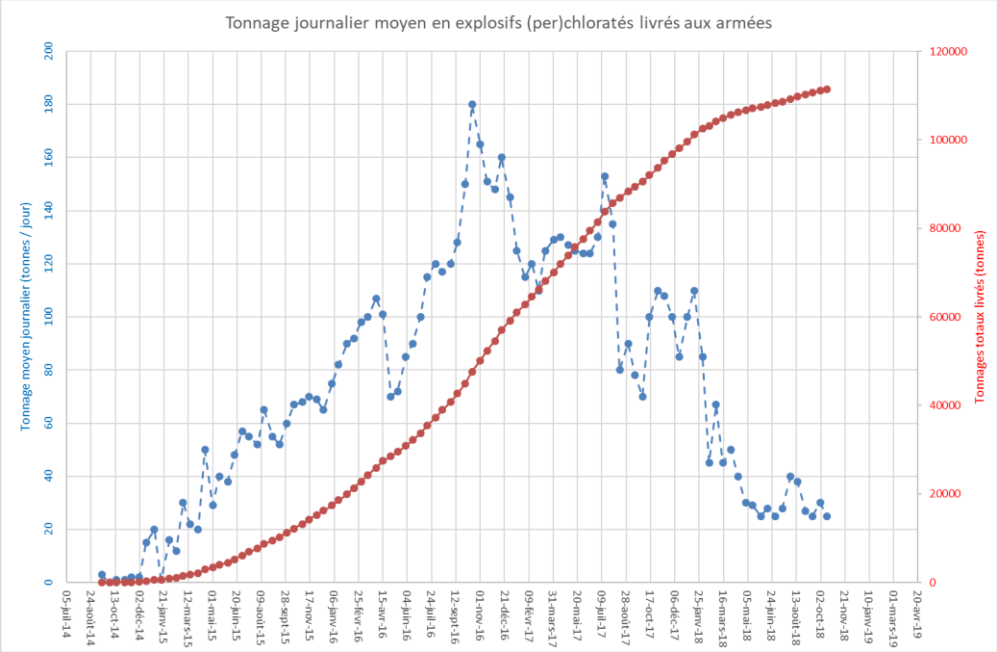


Figure 41 : Tonnages moyens journaliers en explosifs (per)chloratés livrés aux armées entre 1914 et 1918 en France et tonnage total cumulé[234].

[233] D'après Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28. Statistiques : graphiques des productions de matériels et munitions; de la production et des importations de poudres, explosifs, produits chimiques de guerre, fontes et aciers ; de la consommation et des stocks de munitions ; des accidents de tir de 75 (registre d'Albert Thomas). 1914-1918.

[234] *Ibid.*

Concernant les poudres nitrocellulosiques, les quantités renseignées dans les archives par les statistiques du GQG font état d'environ 278 000 tonnes produites en France et de 377 800 tonnes au total si on cumule les quantités produites et celles importées. Ces quantités sont à mettre en perspectives des chiffres avancés par Tissier (1926)[235] d'environ 445 900 tonnes consommées et exportées en France.

Ces chiffres convergent car sont du même ordre de grandeur. Ces tonnages ont culminé avec environ 480 tonnes / jour en moyenne en avril 1917 (cf. Figure 42), restant globalement sur un plateau élevé entre 300 et 500 tonnes jour depuis la mi 1916. C'est aussi en 1917 que culmina le nombre de pièces d'artillerie lourde et l'activité de l'Artillerie friande en poudres propulsives.

Aucune donnée chiffrée portant spécifiquement sur les quantités produites et/ou livrées aux armées en poudre noire n'a été identifiée dans le cadre de la présente recherche.

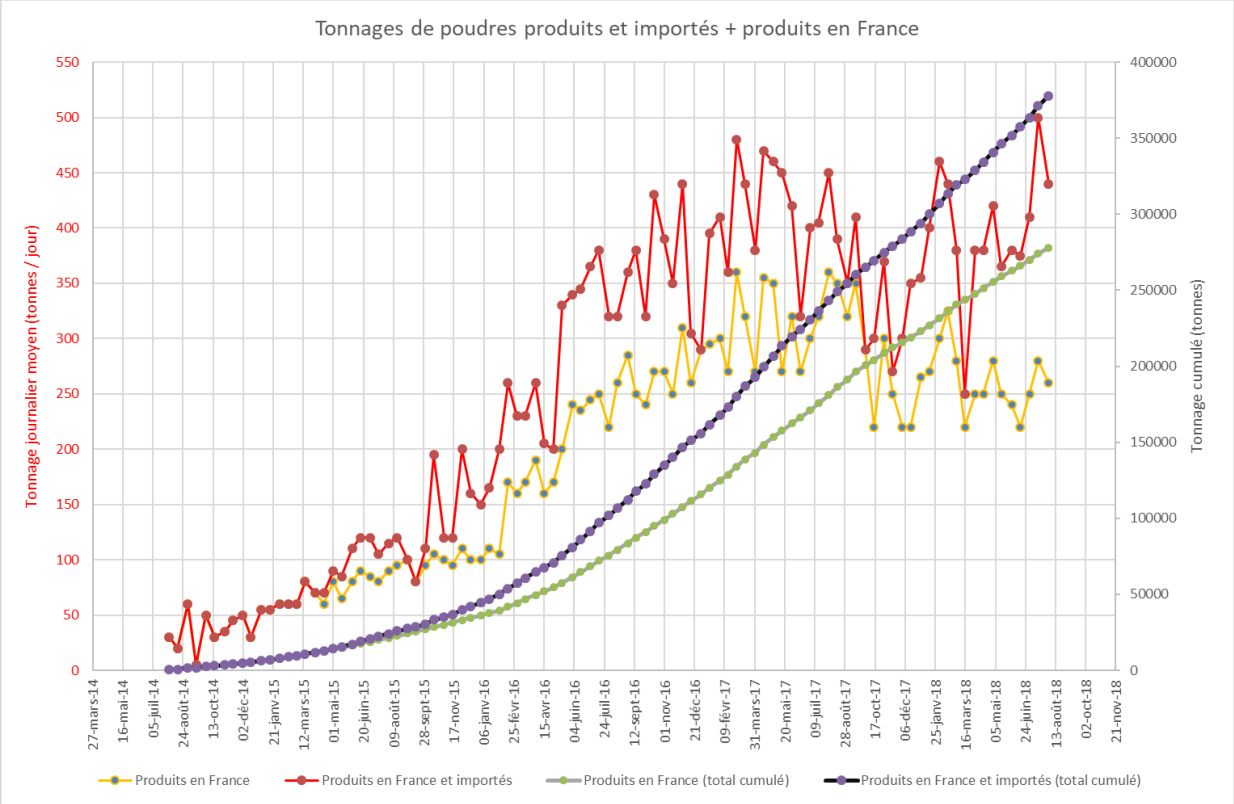


Figure 42 : Evolution (1914-1918) des tonnages journaliers moyens en poudres produits et importés en France[236].

[235] Tissier, L. (1926). *Les poudres et explosifs*, *op. cit*. p.24.

[236] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28, *op. cit.*

Côté allemand

Côté allemand, les tonnages des poudres et explosifs produits durant la Première Guerre mondiale s'élevèrent à 788 245 tonnes[237], dont 284 808 tonnes d'explosifs de substitution (différents nitronaphtalènes, trinitroanisole phénylamines, etc.), 349 206 tonnes de poudre sans fumée[238] et 13 371 tonnes de poudre noire. En Allemagne, les explosifs azotés nitroaromatiques primèrent, avec l'usage préférentiel du TNT, du dinitrotoluène et du dinitrobenzène (cf. Figure 43), 478 550 tonnes d'explosifs azotés furent produites[239]. Ce chiffre ne considère ni les sels énergétiques (chlorate, perchlorate, nitrate d'ammonium) ni les poudres propulsives, et surestime les quantités réelles d'explosifs nitroaromatiques car intègre les intermédiaires de production[240].

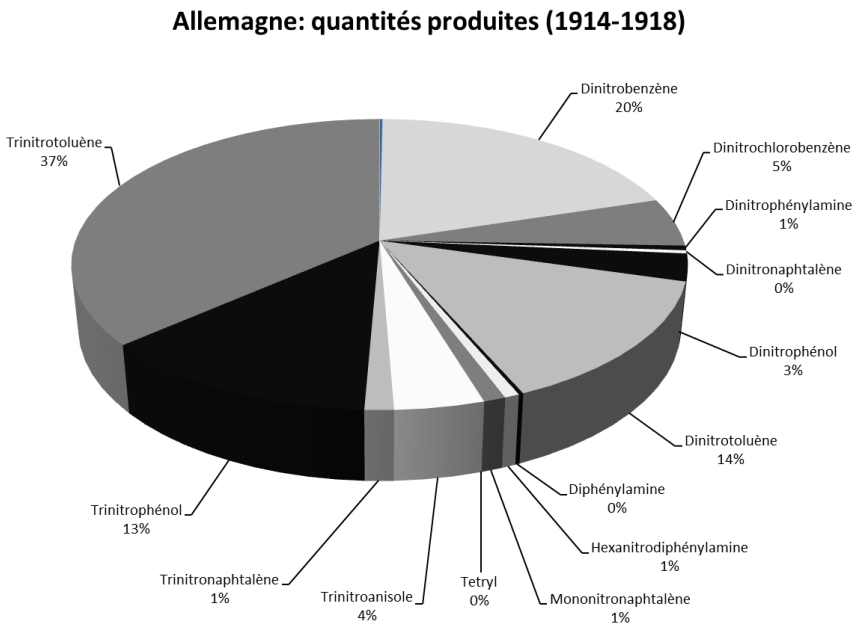


Figure 43 : Proportions relatives des tonnages des explosifs nitroaromatiques produits par l'Allemagne durant la Première Guerre mondiale[241].

[237] Weyrauch, R. (1922). *Waffen- und Munitionswesen. Die deutsche Kriegswirtschaft im Bereich der Heeresverwaltung 1914-1918 Bd. 3. Berlin u. a.: de Gruyter (1922*), cité dans Bausinger, T. (2011). p. 22.

[238] *Ibid.*

[239] Preuß, J. (2006). *Rüstungsaltlasten in Deutschland: Die Entstehung bis zum Jahr 1945*. Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz & HIMASG (Hrsg.). *Boden gut gemacht. Die Sanierung des Rüstungsaltstandortes Stadtallendorf*. Stadtallendorf: 21-51. In T. Bausinger, T. (2011). p. 22, *op.cit*.

[240] *Ibid.*

[241] *Ibid.*

Globalement, le tonnage total de poudres et d'explosifs nitrés, nitratés et (per)chloratés est vraisemblablement du même ordre de grandeur que celui estimé côté français**.** A ce stade de la recherche, il n'est pas possible d'évaluer les tonnages ayant été utilisés sur le front occidental, les Allemands s'étant aussi battu à l'est contre les Russes et sur d'autres fronts plus secondaires (dans les Alpes en appui aux Austro-hongrois). Les livraisons en explosifs et ergols à la Marine de guerre allemande devaient être anecdotiques compte tenu (à l'exception des batailles du Dogger Bank (le 24 janvier 1915) et du Jutland (du 31 mai 1916 au 1 juin 1916)) de la faible activité de cette marine (en surface). L'essentiel de ce qui a été produit par l'industrie allemande fut stocké à terre et utilisé sur les différents fronts terrestres où l'Allemagne était engagée.

Côté britannique et allié

Côté britannique (cf. Figure 44), il a été produit et importé environ 409 000 tonnes de poudres propulsives durant la Première Guerre mondiale[242]. Concernant les explosifs brisants, les Britanniques chargèrent essentiellement leurs engins au TNT et à la *Lyddite* , totalisant, 251 000 tonnes auxquels s'ajoutèrent les 300 000 tonnes de nitrate d'ammonium, essentiellement vouées à entrer dans la fabrication des *Ammonal* des puissants fourneaux de mines de sape[243].

Les quantités totales de poudres et explosifs produites et importées en Grande-Bretagne durant la Première Guerre mondiale s'élevaient à 964 505 tonnes, dont 26% environ pour les explosifs nitrés (principalement le TNT et l'acide picrique), 32% pour les explosifs nitratés (nitrate d'ammonium) et enfin 42% d'ergols solides nitrocellulosique (principalement la *Cordite*, la *Balistite* et le poudre NCT). Ces tonnages sont comparables à ceux estimés pour la France d'une part et l'Allemagne d'autre part.

Les livraisons en explosifs et ergols à la *Royal Navy* devaient être anecdotiques compte tenu de la rareté des combats engagés à l'encontre de la *Hochsee Flötte* allemande. L'essentiel de la production fut entreposé et utilisé à terre sur le secteur britannique du front occidental.

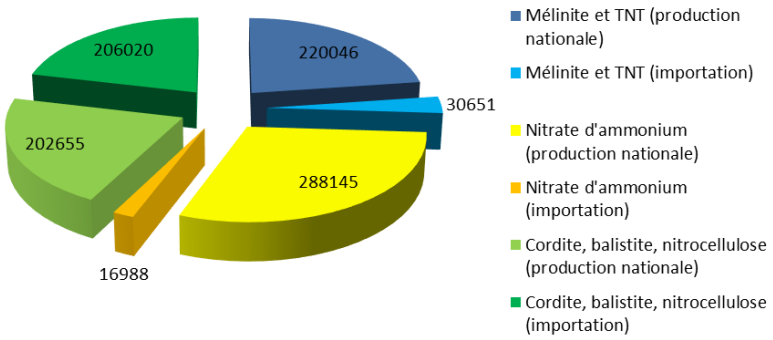


Figure 44 : Tonnages d'explosifs produits et importés par la Grande-Bretagne durant la Première Guerre mondiale[244].

[242] Ministry of Munition. *Munitions* (1976) Vol. X, part IV. In T. Bausinger, T. (2011). *op. cit*. p. 26.

[243] *Ibid.*

[244] *Ibid.*

Les Canadiens quant à eux (cf. Figure 45) produisirent 66 417 tonnes de poudres et explosifs dont 18 940 tonnes de TNT, 19 819 tonnes de *Cordite* et nitrocellulose en chargement, 16 254 tonnes de *Cordite* (vrac), 11 251 tonnes de nitrocellulose (vrac) et 157 tonnes de *Sabulite* (nitrate d'ammonium 51 %, perchlorate d'ammonium 10 %, TNT 15 %, NaCl 24 %)[245].

Enfin, les USA produisirent durant la Guerre 286 899 tonnes de poudre sans fumée et 170 395 tonnes d'explosifs[246].

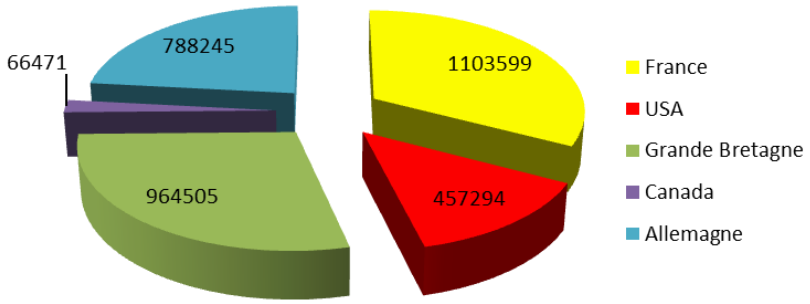


Figure 45 : Tonnages de poudres et explosifs produits durant la Première Guerre mondiale par les principales parties engagées sur le front occidental.

3.2.9 Données relatives aux quantités de composés toxiques agressifs et fumigènes produits et/ou utilisés

Vinet (1919)[247] puis Tissier (1926)[248] estimèrent les quantités de toxiques de guerre produits en France à respectivement 36 638 et 47 591 tonnes, majoritairement du phosgène et du chlore liquide, représentant 77% et 66% de la production totale. Les principaux toxiques de guerre produits en France étaient le phosgène et la *Vincennite* à base d'acide cyanhydrique. La production culmina entre mai et juillet 1918 avec 90 tonnes / jour en moyenne (pour 10 tonnes / jour produites en France début 1915, et l'équivalent environ importé depuis l'étranger)[249]. Ces archives ne précisent pas de quels toxiques de guerre il s'agissait.

[245] Carnegie, D. (1925). *The history of munitions supply in Canada 1914-1918*. London u. a.: Longmans, Green & Co. (1925). In Bausinger, T. (2011). *op. cit*. p.27.

[246] Crowell, B. (1919). *America´s munitions 1917-1918. Washington*: Government Printing Office, In Bausinger, T. (2011). *op. cit*. p. 27.

[247] Vinet, E. (1919). *La guerre des gaz et les travaux des services chimiques français. Chimie & Industrie 2:* 1377-1415, In Bausinger, T. (2011). *op. cit*. p. 31.

[248] Tissier, L. (1926). *op. cit*. p. 31.

[249] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 28, *op. cit*.

Les Britanniques produisirent entre 1916 et 1918, 21 200 tonnes de toxiques de guerre (produits finaux et intermédiaires) auxquelles il convient d'ajouter 21 155 tonnes de chlore liquide (destiné à la production des toxiques de guerre chlorés). Les principales productions concernaient le phosgène, l'éthyliodacétate et le trichlornitrométhane (plus connu sous le nom de *Chloropicrine*)[250].

Les USA expédièrent en Europe en 1918, 3 881 tonnes de toxique de guerre, essentiellement du chlore liquide et de la *Chloropicrine*[251]. L'industrie allemande (et notamment les géants de la chimie BASF, Hoechst, AGFA et Bayer) livrèrent 47 395 tonnes de toxiques de guerre d'une grande diversité, parmi lesquels 12 190 tonnes de diphosgène, 7 659 tonnes d'*Ypérite* et environ 7 000 tonnes de cyanure et chlorure de diphénylarsine (*Clark 1* et *2*) (cf. Tableau 8). Cette production de toxiques émétisants arséniés était une spécificité allemande durant la guerre. Les quantités allemandes sont comparables à celles produites en France. Les chargements fumigènes étaient étroitement liés aux chargement chimiques. Concernant les agents fumigènes, la *Marsite*, à base de $AsCl_3$ fut produite en France à hauteur de 2 710 tonnes et *l'Opacite,* à base de $SnCl_4$, à hauteur de 4 116 tonnes et 8 046 tonnes selon ces deux auteurs. Les Britanniques de leur côté produisirent entre 1916 et 1918 quelques 1 901 tonnes de $ZnCl_2$ et 884 tonnes d'$AsCl_3$[252].

Toxique	Tonnage produit	Fraction du tonnage total
Diphosgène	**12 190**	25,7%
Ypérite	7 659	16,2%
Phosgène	6 000	12,7%
Chloropicrine	4 065	8,6%
Cyanure de diphénylarsine	3 570	7,5%
Dichlore liquide	3 500	7,4%
Chlorure de diphénylarsine	3 327	7,0%
Monochlorméthylformiate	1 928	4,1%
Bromure de xylyle	1 633	3,4%
Bromacétone et bromométhyléthylcétone	1 155	2,4%
Ethyldichlorarsine	1 093	2,3%
Chlorure de phénylcarbylamine	721	1,5%
Dichlordiméthylether	351	0,7%
Ethylcarbazol	85	0,2%
Dibromodiméthyléther	69	0,1%
Diméthylsulfate + Méthylchlorsulfonate	49	0,1%
Total	**47 395**	**100,0%**

Tableau 8 : Production allemande de toxiques de guerre durant la Première Guerre mondiale[253].

[250] National Archives, Kew gardens, London. Ministry of Munitions. Munitions (1976) Vol. XI, part II, In Bausinger, T. (2011), *op. cit*. p.33.

[251] Crowell, B. (1919) *America´s munitions 1917-1918.* Washington: Government Printing Office, In Bausinger, T. (2011), *op. cit*. p.34.

[252] National Archives, Kew gardens, London. Ministry of Munitions. Munitions (1976) Vol. XI, part II, *op. cit*. p. 34.

[253] National Archives, Kew gardens, London, number WO 142/243 Hartley, H. (oJ). *Report on german chemical warfare organisation and policy, 1914-1918.* In Bausinger, T. (2011), *op. cit.* p.30.

3.2.10 Matrice munitions versus compositions chimiques

Une matrice permettant de faire le lien entre la composition chimique des matières utilisées pour la confection des matériels de guerre et en particulier ceux de l'Artillerie et du Génie peut être proposée au regard des éléments de connaissance dégagés par la recherche historique présentée ci-avant (cf. Tableau 9). Ma recherche sur la connaissance des composés constituants les poudres et explosifs ne se limita pas aux seules sources d'archive. Au-delà du seul objectif d'améliorer éventuellement la connaissance historique sur ce qui fut utilisé et projeté sur les sols de France et de Belgique entre 1914 et 1918, il s'agissait par cette démarche, classique dans le domaine des sites et sols pollués, d'extraire de cette connaissance historique ce qui devait, et surtout, pouvait être mesuré dans l'environnement. La porte d'entrée de cette matrice est celle des données historiques ciblant des paramètres chimiques susceptibles de se retrouver dans l'environnement.

Composé	Projectiles d'artillerie allemands	Projectiles d'artillerie francais	Projectiles d'artillerie britanniques	Projectiles d'artillerie de tranchée allemands	Projectiles d'artillerie de tranchée francais	Projectiles d'artillerie de tranchée britanniques	Chargements chimiques allemands	Chargements chimiques français	Chargements chimiques britanniques	Chargements fumigènes	Chargements incendiaires	Chargements éclairants	Chargements à balles	Fusées d'artillerie allemandes	Fusées d'artillerie françaises	Fusées d'artillerie britanniques	Amorces allemandes	Amorces françaises	Amorces britanniques	Détonateurs allemands	Détonateurs français	Détonateurs britanniques	Fourneaux de mine allemands	Fourneaux de mine français	Fourneaux de mine britannique	Ergols solides allemands	Ergols solides français	Ergols solides britanniques
Chlorure (Cl^-)										■																		
Chlorate (ClO_3^-)					■							■					■							■				
Perchlorate (ClO_4^-)				■	■	■																						
Nitrate (NO_3-)	■	■	■	■	■	■						■											■	■	■			
Ammonium (NH_4+)	■	■	■	■	■	■						■											■		■			
Sodium (Na^+)					■																			■				
Potassium (K^+)				■	■							■											■	■	■			
Baryum (Ba^{2+})												■																
Phosphore (P°)											■																	
Magnésium (Mg°)											■																	
Aluminium (Al°)						■					■			■											■			
Antimoine (Sb)													■							■								
Arsenic (As) et composés à base d'arsenic							■																					
Cadmium (Cd)														■														
Cuivre (Cu)														■	■	■												
Silicium (Si)																												
Etain (Sn)										■																		
Plomb (Pb) et composés à base de plomb													■															
Titane (Ti)										■																		
Zinc (Zn)										■				■	■	■												
2,4,6-trinitrophénol *(Mélinite, Grf88)*	■	■	■																	■	■	■						
2,4,6-trinitrotoluène (TNT, *Tolite*)	■	■	■																									
2,4-, 2,6-dinitrotoluène (DNT)	■																											
Dinitrobenzènes (isomères)		■																										
Mono-nitronaphtalènes (isomères)	■	■																										
Dinitronaphtalènes (isomères)	■	■																										
Trinitronaphtalènes (isomères)	■																											
Autres composés nitroaromatiques (trinitroanisole, etc.)	■																											
2,4,6-trinitrophénylméthylnitramine (Tetryl)	■																											
Hexanitrodiphénylamine	■																											
Fulminate de mercure																	■	■	■									
Azoture de plomb																	■	■	■									
Chlorobenzène							■																					
Tétrachlorure de méthane								■																				
Hexachloréthane							■	■	■																			
Composés aromatiques bromés (lacrymogènes)							■	■	■																			
Autres composés bromés et iodés non aromatiques							■	■	■																			
Sulfates, chlorosulfates et sulfures							■	■	■																			
Sulfure d'éthyle dichloré (ypérite)							■	■	■																			
Chloropicrine							■	■	■																			
Chlorure de phénylcarbylamine							■																					
Oxydes de méthyl halogénés							■																					
Chloroformiates							■	■	■																			
Chloracétone							■	■	■																			
Autres toxiques de guerre non gazeux							■	■	■																			
Nitroglycérine																								■	■	■	■	■
Nitrocellulose																										■	■	■
Nitroguanidine (NIGU) (flegmatisant)																										■	■	■
Phénylamines et nitrophénylamines (stabilisants des ergols simple base)																										■	■	■
Centralite (1,3-diéthyl-1,3-diphénylurée) (stabilisant des ergols double base)																										■	■	■

Tableau 9 : Matrice faisant le lien entre les matières énergétiques et agressive constituant les engins de guerre et leurs composition chimique sur la base des données historiques.

3.3. AU DELA DES ARCHIVES. UN ECLAIRAGE ANALYTIQUE NOUVEAU SUR LA COMPOSITION DES POUDRES ET EXPLOSIFS DE LA GRANDE GUERRE.

3.3.1 Objectifs

La chimie analytique (la chimie quantitative, avec le dosage des teneurs[254] de composés ou éléments ciblés dans les matrices solides, des concentrations[255] dans les matrices liquides, la chimie qualitative par la recherche systématique des liaisons organiques) et la chimie isotopique (le dosage des abondances relatives des isotopes d'un atome donné dans un composé) modernes offrent de nos jours des outils performants pour caractériser les compositions des substances et de là pour identifier leurs origines. La découverte fortuite de poudres et d'explosifs directement échantillonnage (dans de bonnes conditions de sécurité) à la faveur de déplacements et missions sur le terrain, apporta une rare opportunité de poursuivre l'exploration des compositions des matières énergétiques de la Grande Guerre au-delà des dires d'archives, par la mise en œuvre des techniques analytiques et isotopiques modernes et originales pour certaines sur les échantillons collectés. Aucune publication n'a été identifiée dans la littérature scientifique portant sur la caractérisation par des analyses au laboratoire de poudres et d'explosifs anciens datant de la Première Guerre mondiale. Le grand intérêt et l'originalité de la démarche est de pouvoir confronter les compositions renseignées dans les archives et documents de référence avec celles dévoilées par la chimie analytique et isotopique, puis d'identifier les éventuelles convergences ou divergences entre les deux sources d'informations, ouvrant sur une discussion concernant leurs causes les plus probables. Les limites de cette démarche en terme de représentativité des échantillons eu égard à la grande diversité des compositions de poudres et explosifs de 1914-1918 sont aussi exposées dans ce qui suit.

3.3.2 Descriptif des échantillons de poudres et explosifs collectés dans le cadre de cette recherche.

De nombreux échantillons d'explosifs ont été collectés entre 2015 et 2023 à la faveur de découvertes de REG lors de reconnaissances et de recherches, en surface, sur le terrain des anciens champs de bataille et des sites de destruction de munitions, mais aussi sous terre dans les galeries de combat à Vauquois (département de la Meuse) et en Argonne (département de la Marne et de la Meuse). L'accès à ces matériels était fortuit à la faveur de travaux de recherche dans des souterrains de combats (jusqu'à – 50m) mais aussi sur des sites de destruction de munitions de la sortie de guerre pour lesquels le BRGM a été mandaté par l'Etat pour apprécier puis gérer les risques. Ces échantillons sont en nombre restreint par rapport à tous ceux qui auraient pu être produits au contact des engins de guerre de 1914-1918. Ils sont possiblement bien plus représentatifs des explosifs de l'extrême fin de guerre que de ceux de 1914. Ce jeu exceptionnel d'échantillon a le mérite d'exister et d'avoir été exploré en usant de méthodes analytiques et isotopiques nouvelles, pointues et originales pour tenter d'aller plus loin que les discours officiels des archives et confronter les informations historiques à celles fournies par les nouvelles analyses.

De nombreux échantillons d'explosif chargeant les grenades à manche allemande (cf. Figure 46) (séries avec le libellé GAM et HG) ont été collectés en Argonne, vus leur forte occurrence mais surtout du degré de corrosion avancé de leurs fines parois en acier autorisant l'échantillonnage en toute sécurité de leur chargement, parfois lui-même fortement déprécié.

---

[254] Une masse de composé rapporté à la masse de sa matrice ($mg.kg^{-1}$).

[255] Une masse de composé rapporté au volume de sa matrice ($mg.L^{-1}$).

Cet explosif se présentent souvent en une masse noire pulvérulente imprégnant un matériaux d'aspect cartonneux (exemple échantillon GAM-VAU2, grenade à manche, Vauquois) ou encore en poudre grise brunâtre cristallisée et finement aciculaire (exemple échantillon COR-GAM2, grenade à manche, secteur Corniche, Argonne ouest).

Figure 46 : Grenade à manche allemande, modèle 1917[256].

Des explosifs issus d'obus proviennent de sites de destruction de munitions de Spincourt (département de la Meuse), de Conteville (département de la Somme). Ils se présentaient sous forme de fragments centimétriques dispersés à même les sols (*chunks*) ou encore de masses solidaires de culots ou de section ogivale d'engins fracassés par les destructions par pétardement.

La Figure 47 et la Figure 48 donnent un aperçu photographique d'une sélection, respectivement, de poudres propulsives de cartouches d'armes portatives françaises et allemandes et d'explosifs issus de projectiles et de pains pour la confection de fourneaux de mines (*Donarite* et *Westfalite* (Berlin) allemandes) provenant du Bois des Chevaliers (département de la Meuse) et du secteur de la Fille Morte en Argonne. Ces explosifs nitrés et ou nitratés se présente en général en fragments massifs d'aspect cristallisé brun orangé à brun noirâtre (exemple échantillon TNT1, Spincourt), blanc crème (dinitrobenzène, échantillon DNB, Vaudoncourt), ou en poudre constituée de cristaux aciculaires brun rougeâtre. Un échantillon (DYN) a été constitué à partir de *Dynamite-gomme* française provenant du Bois des Chevaliers. Concernant les explosifs explicitement (per)chloratés, les échantillons suivants ont pu être constitués :

- L'échantillon *58T* provient du chargement d'une bombe de tranchée française empennée à ailette du type « Crapouillot » découverte dans le secteur Corniche, Argonne ouest. Cet explosif se présente sous forme de cristaux grossièrement cristallisés pluri millimétriques gris à incolores liés par une matrice d'aspect terreuse teintée de jaune vif (cf. Figure 48);

- Les échantillons de *Cheddite* française proviennent d'un important stock de *Cheddite* en vrac, conditionnée dans des sacs en toile de jute, entassés sur plusieurs mètres de hauteur, découvert dans une soute vers – 5 m de profondeur dans le secteur de la Corniche, Argonne ouest (cf. Figure 48). Ce dépôt a été évacué par les démineurs de la Sécurité Civile, centre de Metz. Cet explosif se présente sous forme de pâte à la texture saccharroïde, beige à caramel et odorante ;

[256] Musée canadien de la guerre. Le Canada et la Première Guerre mondiale. Armes et munitions. ¨Pièces d'artillerie et grenades. https://www.museedelaguerre.ca/premiereguerremondiale/objets-et-photos/armes-et-munitions/pieces-dartillerie-et-grenades/

- Les échantillons de *Perdite* allemande proviennent d'une charge de destruction de plusieurs centaines de sacs en toile de jute (parfaitement conservés) découverte vers 40 m de profondeur à l'intersection de galeries de combat (système A3) du secteur de la Haute-Chevauchée en Argonne. Les emballages en papier paraffiné de ces explosifs, dans un état de conservation remarquable, portent l'indication de leur provenance (cf. Figure 47). Cette *Perdite* provenaient ainsi des usines (i) *Cahücitwerke Nürnberg-Fabrik Neumarkt* et (ii) *Norddeutsche Sprengstoffwerke Actien-Gesellschaft, Hamburg*. La *Perdite,* conditionnés en pain de 1 kg se présente sous la forme d'une fine poudre beige, légère, légèrement odorante, à l'aspect de sciure de bois.

Trois échantillons d'explosifs proviennent de projectiles d'artillerie de tranchée allemands de type Mauser *glatter leichter Minenwerfer*, et Magener. Un échantillon provient d'un projectile d'artillerie de tranchée française 77 mm de type Cellerier.

Enfin, furent également échantillonnées des poudres propulsives nitrocellulosiques chargeant les cartouches d'armes portatives (mitrailleuses, fusils d'assaut) Mauser (*Gewehr 98* ou Mauser modèle 1898 allemand, de calibre 7,92 mm) (série d'échantillons M) et Lebel (ou Lebel modèle 1886 français, de calibre 8 mm) (série d'échantillons LEB). Ces poudres se présente sous forme de paillettes grossièrement quadrangulaires pluri millimétriques anthracite à l'éclat sub-métallique. Les paillettes des poudres Lebel sont légèrement plus grossières que leurs homologues Mauser allemands (cf. Figure 47). Aucun échantillon de poudre noire n'a pu être constitué.

Un total de 72 échantillons de poudres et explosifs a été rassemblé dans le cadre de la présente recherche. La typologie et la numération de ces échantillons sont exposés dans le Tableau 10 suivant.

Nature des échantillons	Nombre d'échantillons
Poudres propulsives de cartouche Mauser calibre 7,92 mm (Allemagne)	12
Poudres propulsive de cartouche Lebel calibre 8 mm, 8 x 50 R modèle 1886 (France)	2
Grenades à manche allemande (modèle 1917)	27
Fragments d'explosifs issus de chargement de projectiles d'artillerie	14
Echantillons constitués à partir des sacs de *Cheddite* (France)	3
Echantillons provenant de pains d'explosifs de sureté allemands	5
Dynamite-gomme française	1
Echantillons provenant de pains de *Perdite* (Allemagne)	3
Poudre perchloratée de projectile « Crapouillot » 58T (France)	1
Poudre de projectile d'artillerie de tranchée française 77 mm Cellerier	1
Explosifs de projectiles d'artillerie de tranchée allemands (Mauser *glatter leichter Minenwerfer, Magener*, etc.)	3
TOTAL	**72**

Tableau 10 : Echantillons de poudres et explosifs analysées.

Les Figures 47 à 51 donnent un aperçu photographique de quelques échantillons collectés.

A noter qu'un échantillon particulier et exceptionnel a aussi été collecté en janvier 2015. Il s'agit d'un échantillon de *Clark* (chlorure ou cyanure de diphénylarsine) renfermé dans une fiole d'obus allemand à *Croix bleue* de 77 mm long brisé en son milieu, provenant du site de brûlage et de vidage de munitions chimiques ex-allemandes de l'entre-deux-guerres Clere & Schwander de Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt) en Meuse.

Figure 47 : Sélection d'échantillons de poudres propulsives de cartouche de Mauser (calibre 7,92 mm, série « M », Allemagne) et de Lebel (calibre 8 mm, 8 x 50 R modèle 1886, série « Leb », France). Aperçu photographique.

Cristaux perchloratés provenant du chargement résiduel d'un projectile français d'artillerie de tranchée 58 T

Projectile français d'artillerie de tranchée 58 T montrant une lumière sous l'ogive (Corniche, Argonne Ouest)

Perdite. La Haute-Chevauchée, Cote 285. Meuse.

Pain de Perdite d'un kilogramme dans son emballage de papier paraffiné. La Haute-Chevauchée, Cote 285. Meuse.

Empilement de sac de toile de jute renfermant de la Cheddite dans un stockage souterrain français (Corniche).

Deux échantillons de Cheddite provenant du stockage souterrain de la Corniche (ci-contre).

Figure 48 : Sélection d'échantillons d'explosifs (per)chloratés. Aperçu photographique.

Echantillon d'explosif issu d'une grenade à manche allemande (échantillon COR). Corniche, Argonne ouest.

Echantillon d'explosif issu d'une grenade à manche allemande (échantillon COR GAM2). Corniche, Argonne ouest. Les cristaux de nitrate d'ammonium sont parfaitement visibles.

tz

Echantillon d'explosif issu d'une grenade à manche allemande (échantillon GAM-VAU1) Vauquois, Argonne.

Echantillon d'explosif issu d'une grenade à manche allemande (échantillon GAM-VAU2). Vauquois, Argonne.

Echantillon d'explosif issu d'une grenade à manche allemande (échantillon GAM-VAU3). Vauquois, Argonne.

Echantillon d'explosif issu d'un projectile de tranchée allemand Maganer (échantillon MAG). La texture cristalline est ici remarquable.

Figure 49 : Sélection d'échantillons d'explosifs nitrés nitratés de grenades à mancje et de projectiles d'artillerie de tranchée allemands. Aperçu photographique.

Fragments de TNT collectés au sol. Site de désobusage de Rampont à Muzeray (département de la Meuse).

Explosif pulvérulent apparenté au TNT. Site de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse).

Fragments d'explosif complexe nitroaromatique mêlé d'un toxique de guerre. Site de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse).

Obus explosif allemand de 105 mm ovalisé et sectionné à l'ogive, laissant apparaître son chargement de TNT. L'insertion de la gaine-relai est encore visible au centre. Site de pétardement de Vaudoncourt Loison (département de la Meuse).

Figure 50 : Sélection d'échantillons d'explosifs de projectiles d'artillerie allemands. Aperçu photographique.

Culot d'un obus explosif allemand de 105 mm, laissant apparaître son chargement de dinitrobenzène. Site de pétardement de Vaudoncourt Loison (département de la Meuse).

Fragment d'un chargement de dinitrobenzène. Site de pétardement de Vaudoncourt Loison (département de la Meuse).

Culot d'un obus explosif de 155 mm déformé par pétardement exposant son chargement résiduel en explosif nitroaromatique. Site de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse).

Obus explosif allemand de 105 mm sectionné à l'ogive par pétardement exposant son chargement résiduel en TNT. Site de désobusage F.N. Pickett & Fils à Conteville (département de la Somme).

Figure 51 : Sélection d'échantillons d'explosifs de projectiles d'artillerie allemands. Aperçu photographique.

3.3.3 Echantillonnage d'explosifs d'obus français de 75 mm du gouffre de Jardel (Sécurité civile, octobre 2000)

Ce site d'enfouissement d'engins de guerre, situé à Jardel dans le département du Doub, Ce gouffre constitue la source de la rivière Loue. La présence des REG est connue depuis 1972, date des premières explorations Une nouvelle mission d'exploration a été effectuée du 15 au 18 octobre 2010 par cinq démineurs de la Sécurité Civile. Cette mission permit de mettre en évidence la présence de 17 types de munitions de neuf calibres différents (de 65 mm à 220 mm) et de 14 longueurs différentes (240 à 813 mm).

Figure 52 : Munitions anciennes dans les eaux de la Loue au sein du gouffre de Jardel (département du Doubs). Octobre 2000[257](à gauche), et localisation du point de prélèvement dans une munition de 75 mm volontairement déflagrée (à droite).

A la faveur de cette reconnaissance, deux obus de 75 mm ont été collectés puis transportés vers le terrain de destruction du centre de déminage de Colmar (département du Haut-Rhin), qui ont été ouverts à l'aide de charges pyrotechniques coupantes afin d'avoir accès au chargement des engins et d'effectuer des prélèvements d'explosif (cf. Figure 52). Cette technique a permis d'obtenir l'ouverture à distance de la munition sans entraîner son fonctionnement nominal (explosion).

3.3.4 Caractérisation chimique

Choix des paramètres et composés analysés et protocoles analytiques

Le choix des composés et substances, organiques et inorganiques, à analyser repose sur l'état des connaissances historiques sur la composition des poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale sur le front occidental, présenté et développé dans ce qui précède. Selon les paramètres recherchés, plusieurs laboratoires spécialisés ont été sollicités pour caractériser quantitativement et/ou qualitativement ces échantillons (i) le laboratoire d'analyses du BRGM pour les ions chlorate et perchlorate et les autres composés inorganiques (et en particulier les différentes formes de l'azote inorganique), (ii) la laboratoire Envilytix GmbH de Wiesbaden (Allemagne), spécialisé dans l'analyses des matières énergétiques, des toxiques de guerre, leurs intermédiaires de production, impuretés et leurs sous-produits de transformation environnementale et (iii) le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) rattaché à l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui développa des méthodes d'analyses d'environ 50 substances entrant dans la composition des poudres et explosifs de 1914-1918 ainsi que leurs sous-produits de transformation environnementale.

---

[257] Ministère de l'Intérieur. Déminage, Sécurité civile. *Rapport technique « Gouffre de Jardel »*. Annexe photographique. Non daté. Non signé.

Ces méthodes visent spécifiquement la matrice aqueuse. La définition de cette liste résulte de recherches bibliographiques de l'ANSES sur la composition des poudres et explosifs et leur devenir environnemental, appuyé par ailleurs en cela par le BRGM. Les standards d'étalonnage du LHN ont été fournis par Envilytix.

Comme exposé dans la Section 2h, le panel analytique à utiliser pour caractériser les matières énergétiques nitrées et/ou nitratées ne saurait se limiter aux seules molécules et composés entrant explicitement dans les formulations renseignées dans les archives et la documentation historique. Les NAC sont en effet des molécules réactives, se transformant, une fois exposées aux conditions environnementales, selon de nombreux cheminements réactionnels, biotiques et/ou biotiques. Ces métabolites et sous-produits persistants de transformation environnementale sont venus compléter la liste analytique fondée sur les seules indications historiques. Enfin, une troisième catégorie de composés a été intégrée à la liste du LHN : les impuretés et certains intermédiaires de production susceptibles d'être présents dans les formulations industrielles. Le panel analytique du LHN a été volontairement étendu à des explosifs apparus, produits et utilisés postérieurement à la Première Guerre mondiale (RDX[258], HMX[259], PETN[260]) dans la perspective de réaliser de campagnes nationales sur la recherche des résidus d'explosifs dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) en 2021 et 2022. La nitroguanidine (NIGU) utilisée comme composant dans les poudres triple-base, c'est-à-dire à base de nitrocellulose, nitroglycérine, ainsi que la nitroglycérine (trinitroglycérine) n'ont pas été recherchées. Il en est de même des isomères du trinitrobenzène qui est une impureté du TNT.

En résumé, les listes analytiques retenue dans le cadre de cette recherche, constituées par trois laboratoires spécialisés, comprennent :

1. Les composés inorganiques et organiques entrant explicitement dans les formulations des matières énergétiques documentées dans les archives historiques,

2. Les métabolites et sous-produits persistants issus de processus naturels biotiques et abiotiques de transformation au contact de l'environnement,

3. Les impuretés et intermédiaires de production.

A noter que les toxiques de guerre, leurs sous-produits de transformation et autres impuretés n'ont pas été considérés dans ce panel analytique de cette section de la recherche, visant spécifiquement les composés issus des poudres et explosifs.

Dosage des composés inorganiques (laboratoire du BRGM)

Ont été recherchés sur les échantillons prioritairement les ions chlorate ClO_3^- et perchlorate ClO_4^- ainsi que les espèces inorganiques azotées susceptibles de les porter dans les explosifs nitratés. Les relations éventuelles des ions perchlorate et chlorate avec l'azote ont été explorées. Les espèces inorganiques azotées considérées sont les nitrates NO_3^- (degré d'oxydation de l'azote 5+), les nitrites NO_2^- (degré d'oxydation de l'azote 3+) et la forme réduite de l'azote, l'ammonium (NH_4^+) (degré d'oxydation de l'azote 3-).

[258] 1,3,5-trinitroperhydro-1,3,5-triazine, encore dénommé Cyclonite ou Hexogène.

[259] *High Melting point eXplosive*, cyclotétraméthylène-tétranitramine ou *Octogène*.

[260] Tétranitrate de pentaérythritol, encore dénommé Pentrite (Penthrite) ou Nitropenta.

Le panel analytique a été étendu sur certains échantillons à d'autres cations et anions majeurs comme les chlorure Cl^-, sulfate SO_4^{2-}, phosphate PO_4^-, fluorure F^-, calcium Ca^{2+}, sodium Na^+, magnésium Mg^{2+} et potassium K^+. L'objectif était d'identifier les éventuels associations, sels, présents dans ces explosifs. Pour des raisons de budget limité, cette approche analytique étendue n'a pu être généralisée à l'ensemble des échantillons collectés. Les cations, anions et oxyanions (dont les chlorate et perchlorate) ont été analysés par le laboratoire du BRGM après lixiviation des échantillons sur 24 heures selon le protocole de la norme NF EN 12457-2, suivie par (i) l'analyse des cations (Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, P) par ICP/AES (*Inductively Coupled Plasma / Atomic Emission Spectrometry,* spectrométrie d'émission atomique (AES) à plasma à couplage inductif (ICP)) (norme NF EN ISO 11885) sur lixiviat, (ii) l'analyse des ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrates (NO_3^-), sulfates (SO_4^{2-}) et chlorure (Cl^-) par la méthode par chromatographie ionique (IC) 2D (DIONEX) (IC-IC-MS, IC tandem) selon la norme NF EN ISO 10304 (avec évaluation des aires des pics), (iii) l'analyse colorimétrique de l'ammonium (NH_4^+), du phosphate (PO_3^-), des nitrites (NO_2^-) par spectrophotométrie visible automatisée (méthode Interne, norme NF ISO 15923-1) (en 2021).

L'ion ammonium (NH_4^+) a été dosé en 2018 par analyse en flux (FFA (*Fluid Flow Analysis*) et FIA (*Flow Injection Analysis*)) et détection spectrométrique. Les analyses sur lixiviat ont été effectuées sur des échantillons filtrés à 0,45 µm.

Des analyses visant spécifiquement les composés organiques, et en particuliers les composés nitrés, ont aussi été effectuées sur certains échantillons, avec pour certains d'entre eux des analyses quantitatives sur brut ou lixiviat et pour d'autre des analyses qualitatives ou semi-quantitative (par la recherche systématique des liaisons organiques).

Recherches des liaisons organiques et analyses des NAC par le laboratoire Envilytix GmbH (Allemagne)

Les potentialités analytiques du laboratoire spécialisé laboratoire Envilytix GmbH ont été mobilisées dans un premier temps afin d'identifier les constituants majeurs des échantillons d'explosifs collectés sur le terrain sans avoir à se limiter à certaines listes analytiques quantitatives standards et restreintes proposées par certains laboratoires commerciaux. Une recherche systématique des liaisons organiques (*screening*) par HPLC (*High Pressure Liquid Chromatography*) (approche semi-quantitative) a ainsi été réalisée en avril 2019 sur un panel de 15 échantillons (échantillons DNB1, GAM1, 2 et 3, PIC, TNN1, TNT1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7).

Ce laboratoire a par ailleurs réalisé une analyse qualitative selon la méthode de GC/MS-screening, sur un échantillon de *Clark* collecté à Vaudoncourt. L'échantillon a été solubilisé au préalable dans l'acétone.

Les recherches exploratoires par *screening* semi-quantitatif ont été poursuivies en juillet 2019 sur cinq échantillons (*Cheddite, Westfalite* Berlin, DYN (Dynamite-gomme), *Donarite* Fille Morte, *Donarite* BDC (Bois des Chevaliers) en couplant cette fois-ci les mesures par GC/MS (*Gas Chromatography / Mass Spectrometry,* spectrométrie de masse (MS) couplée à la chromatographie en phase gazeuse (GC)) et HPLC-DAD (*High-Performance Liquid Chromatography with photoDiode-Array Detection,* chromatographie en phase liquide haute performance (HPLC) couplée à un détecteur à barrette de photodiodes) visant les composés explosifs polaires et apolaires. Les échantillons GAMV0, GAMV02, GAMV1, 2, 3, et 4, GAMV2, GAM1,2 et 3, RAD, TNT1, 2, et 3 (soit un total de 14 échantillons) ont été analysés de façon quantitative par HPLC en décembre 2019. Les aliquotes ont été au préalable dissouts dans l'acétonitrile et soniqués. La solution a été analysée par HPLC-DAD (selon la norme DIN ISO 11916-1).

Le *screening* par HPLC a été reconduit en février 2020 sur une sélection d'échantillons (échantillons 58T, Four S, GAM COR, GAM COR2, GAM VAU1, 2, 3 et 4, MAG, soit un total de neuf échantillons).

Analyse des NAC solubles de l'explosif allemand Perdite par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES

Deux méthodes analytiques sur deux listes de composés ont été développées par ce laboratoire puis mises en œuvre pour les analyses des poudres et explosifs (cf. Tableau 11 et Tableau 12).

La première est l'injection directe en LC-MS/MS (*Liquid Chromatography coupled to tandem Mass Spectrometry*, chromatographie en phase liquide (LC) couplée à deux spectromètres de masse (MS) en tandem) avec étalonnage externe avec dopage systématique. Cette technologie sensible et hautement sélective permet d'atteindre des Limites de Quantification (LQ) comprises entre 1 à 50 $ng.L^{-1}$. L'incertitude maximale est de 40% (50% à la Limite de Quantification). Cette méthode est accréditée COFRAC pour 11 molécules sur 24 (46%).

La seconde est celle de SBSE–GC–MS/MS) (*Stir Bar Sorptive Extraction - Gas Chromatography-tandem (2D) Mass Spectrometry,* extraction par sorption sur barreau magnétique (SBSE), séparation par chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à la spectrométrie de masse (MS)). L'étalonnage a été effectué avec huit standards marqués.

Les performances de cette méthode sélective sont les suivantes : Limite de Quantification comprises entre 1 à 50 $ng.L^{-1}$, avec une incertitude maximale de 35% (50% à la Limite de Quantification). Cette méthode est accréditée COFRAC pour 28 molécules sur 30 (93%). Le développement de cette méthode analytique a fait l'objet d'une publication[261].

Les analyses ont été réalisées sur des lixiviats provenant de la mise en contact d'explosifs perchlorates allemands *Perdite* collectés dans un souterrain allemand de la Haute-Chevauchée en octobre 2021 avec de l'eau. Cette analyse ne visait pas la quantification des composés présents dans l'explosif mais d'identifier les NAC solubles présents.

A noter que ces méthodes sur ces listes de composés ont été initialement développées pour mener une recherche des résidus d'explosifs dans les EDCH (Eaux Destinées à la Consommation Humaine) dans le cadre de la campagne nationale et régionale (Grand 'Est) menées par l'ANSES sur des substances non réglementées dites « émergentes ». Le contenu et les résultats de ces campagnes sont exposés dans la Section 4e du présent manuscrit.

[261] Galmich, M., Colin, A., Clavos, M.C., Pallez, C., Rosin, C., Dauchy, X. (2021). *Determination of nitroaromatic explosive residues in water by stirbar sorptive extraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry. Analytical and Bioanalytical Chemistry* (2021) 413:159–169.

Analyses par injection directe LC MSMS			
Composé	***Acronyme / synonyme***	***N°CAS***	***Origine***
1,3,5,7-Tétranitro-octahydro-1,3,5,7-tétrazocine	HMX / Octogène	2691-41-0	Explosif post WWI
1,3,5-Trinitro-7-nitroso-1,3,5,7-tétraazocyclooctane	Mononitroso-HMX	5755-28-2	Métabolite HMX
1,3,5-Trinitro-hexahydro-1,3,5-triazine	RDX / Hexogène	121-82-4	Explosif post WWI
Hexahydro-1,3,5-trinitroso-1,3,5-triazine	TNX	13980-04-6	Métabolite RDX
2,4-Diamino-6-Nitrotoluène + 2,6-Diamino-4-Nitrotoluène	2,4-DA-6-NT +2,6-DA-4-NT	6629-29-4	Métabolite du TNT
2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	2-A-4,6-DNT + 4-A-2,6-DNT	35572-78-2	Métabolite du TNT
2,4,6-Trinitrotoluène	2,4,6-TNT / TNT	118-96-7	Explosif
2,2',6,6'-Tetranitro-4,4'-azotoluène	2,2'-Azo	52132-59-9	Métabolite du TNT
2,2',6,6'-Tetranitro-4,4'-azoxytoluène	2,2'-Azoxy	51857-25-1	Métabolite du TNT
4,4',6,6-Tetranitro-2,2'-azoxytoluène	4,4'-Azoxy	35212-01-2	Métabolite du TNT
1,3,5-Trinitrobenzène	1,3,5-TNB	99-35-4	Métabolite du TNT
1,3,5-Trinitronaphtalène	1,3,5-TNN	2243-94-9	Explosif
1,3,8-Trinitronaphtalène	1,3,8-TNN	2364-46-7	Explosif
1,4,5-Trinitronaphtalène	1,4,5-TNN	2243-95-0	Explosif
2,4,6-Trinitrophénol	PA/Acide picrique/ Mélinite	88-89-1	Explosif
3,5-Dinitroaniline (=3,5-dinitrophénylamine)	3,5-DNA	618-87-1	Explosif
N-Méthyl-2,4,6-trinitroaniline	N-Methylpicramide	1022-07-7	Métabolite du Tetryl
2,2',4,4',6,6'-Hexanitrodiphénylamine	Hexyl/Dipicrilamine	131-73-7	Explosif post WWI
1,2-Dinitroglycérine + 1,3-Dinitroglycérine	1,2-DNG + 1,3-DNG	621-65-8	Métabolite de NG
Tétranitrate de pentaérythritol	PETN (pentrite, nitropenta)	78-11-5	Explosif post WWI
Trinitrocrésol	Cresylite	602-99-3	Explosif

	Explosif, ergol utilisés durant la Grande Guerre
	Sous-produit de transformation environnementale des explosifs, ergols utilisés durant la Grande Guerre
	Explosif, ergol utilisés postérieurement à la Grande Guerre
	Sous-produit de transformation environnementale des explosifs, ergols utilisés postérieurement à la Grande Guerre

Tableau 11 : Nature et origine des composés analyses par injection Directe en LC-MS/MS par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES.

Extraction SBSE et analyse en GC-MS/MS			
Composé	***Acronyme / synonyme***	***N°CAS***	***Origine***
2-Nitrotoluène	2-NT	88-72-2	Intermédiaire de production du TNT
3-Nitrotoluène	3-NT	99-08-1	
4-Nitrotoluène	4-NT	99-99-0	
2,6-Dinitrotoluène	2,6-DNT	606-20-2	Explosif, ergol, métabolite du TNT, intermédiaire de production du TNT
2,5-Dinitrotoluène	2,5-DNT	619-15-8	
2,3-Dinitrotoluène	2,3-DNT	602-01-7	
2,4-Dinitrotoluène	2,4-DNT	121-14-2	
3,5-Dinitrotoluène	3,5-DNT	618-85-9	
3,4-Dinitrotoluène	3,4-DNT	610-39-9	
2,4,6-Trinitrotoluène	2,4,6-TNT / TNT	118-96-7	Explosif
Nitrobenzène	NB	98-95-3	Intermédiaire de production des DNB
1-chloro-3-nitrobenzene	1-Cl-3-NB	121-73-3	Précurseur de synthèse d'explosifs
1-chloro-2+4-nitrobenzene	1-Cl-2+4-NB	88-73-3	
Dinitrochlorobenzène	DNCB	97-00-7	
1,4-Dinitrobenzène	1,4-DNB	100-25-4	Explosif
1,3-Dinitrobenzène	1,3-DNB	99-65-0	
1,2-Dinitrobenzène	1,2-DNB	528-29-0	
2 Nitrophénol	2-NPh	88-75-5	Intermédiaire de production du TNP
2-Nitroaniline	2-NA	88-74-4	Intermédiaire de production de la DNA
1-Nitronaphtalène	1-NN	86-57-7	Intermédiaire de production des DNN
2-Nitronaphtalène	2-NN	581-89-5	
1,5-Dinitronaphtalène	1,5-DNN	605-71-0	Explosif
1,3-Dinitronaphtalène	1,3-DNN	606-37-1	
1,6-Dinitronaphtalène	1,6-DNN	607-46-5	
1,8-Dinitronaphtalène	1,8-DNN	602-38-0	
Diphénylamine	DPA	122-39-4	Stabilisant des ergols
2-Nitrodiphénylamine	2-Nitro-DPA	119-75-5	
4-Nitrodiphénylamine	4-Nitro-DPA	836-30-6	
Dinitroanisole (2,4)	DNAN	119-27-7	Explosif
2,3-Dimethyl-2,3-dinitrobutane	DMNB	3964-18-9	Marqueur des explosifs modernes

	Explosif, ergol utilisés durant la Grande Guerre
	Précurseurs des explosifs, ergols utilisés durant la Grande Guerre
	Stabilisants des ergols
	Autres

Tableau 12 : Nature et origine des composés analysés en GC-MS/MS après extraction SBSE par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES.

Analyses réalisées par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris (LCPPP) pour la Sécurité Civile (échantillon du Gouffre de Jardel)

Les quatre prélèvements d'explosifs collectés par la Sécurité Civile dans les projectiles du gouffre de Jardel furent transmis au Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris (LCPPP) pour analyse. Les analyses furent effectuées, notamment au moyen de chromatographie liquide (HPLC) couplée à l'ultraviolet (UV), de chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CPG / MS) et de spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF).

Résultats

Les tableaux rassemblant les résultats analytiques sont placés en Annexe A du présent manuscrit.

- **Ions chlorate, perchlorate, nitrate, nitrite et ammonium**

Poudres nitrocellulosiques

Les ions perchlorate ont été détectés dans tous les échantillons de poudres nitrocellulosiques de Mauser, avec des teneurs comprises entre 51 µgClO_4^-.kg^{-1} MS et 6 488 µgClO_4^-.kg^{-1} MS alors qu'ils n'ont été détectés dans les poudres de Lebel que dans un des deux échantillons à hauteur de 38 µgClO_4^-.kg^{-1} MS. Les ions chlorate ont été quantifiés dans sept échantillons de poudres nitrocellulosiques sur 12 à des teneurs pouvant atteindre 12,45 mgClO_3^-.kg^{-1} MS. On constate qu'une corrélation entre la teneur en espèces azotées et en perchlorate se dessine pour les échantillons de poudres propulsives d'armes portatives lorsque les perchlorates ont été détectés (cf. Figure 54 et Figure 55). L'occurrence d'ions chlorate et perchlorate dans ces poudres nitrocellulosiques est inattendue et ne trouve aucune explication dans la documentation et les archives consultées dans le cadre de cette recherche.

Grenades à manche allemandes

Les ions perchlorate ont été systématiquement détectés de façon inattendue dans les échantillons d'explosifs provenant de 26 échantillons de grenades à manche allemandes. Aucune corrélation significative entre les teneurs en perchlorate et celles en espèces azotées (nitrate + nitrite+ ammonium) n'apparaît à la lumière des analyses réalisées (cf. Figure 53). Les échantillons d'explosifs provenant des grenades à manche se distinguent très nettement des autres échantillons de poudres et explosifs par leurs teneurs élevées et très variables en ions perchlorate. Les teneurs en perchlorate forment en effet un large faisceau s'étendant entre 7 µgClO_4^-.kg^{-1} MS jusqu'à 37 913 119 µgClO_4^-.kg^{-1} MS (38 gClO_4^-.kg^{-1} MS, échantillon HG3) dans une gamme pourtant restreinte de teneurs en espèces azotées de 10 à 1 000 mg (NO_2^- + NO_3^- + NH_4^+) (cf. Figure 56 et Figure 57). L'échantillon HG3 présente aussi la particularité d'être riche en potassium avec 10,65 gK^+.kg^{-1} MS. A noter que le nombre de moles de potassium (mmol) et de charges positives compensent dans cet échantillon particulièrement perchloraté approximativement le nombre de moles d'ions perchlorate (mmol) et de charges négatives. Cet échantillon renfermerait potentiellement du $KClO_4$ (cf. Figure 57).

Les ions chlorate ont été détectés dans ces échantillons dans environ la moitié d'entre eux, jusqu'à des teneurs atteignant 253 mgClO_3^-.kg^{-1} MS (cf. Figure 53). Il est à noter que le jeu de données des teneurs en chlorate est difficilement exploitable d'un point de vue statistique du fait de la variabilité des LQ (initialement élevée) appliquées par le laboratoire selon les matrices et les teneurs des autres oxyanions (perchlorate, nitrate, sulfate, etc.) (oscillant entre 0,05 mg.kg^{-1} MS à 1 mg.kg^{-1} MS). Les LQ appliquées par le laboratoire diminuèrent durant la démarche de caractérisation des échantillons d'explosifs qui ne purent être tous livrés de façon synchrone au laboratoire. L'occurrence d'ions chlorate et perchlorate dans ces explosifs de grenades à manche standards allemandes ne trouve aucune explication dans la documentation et les archives consultées dans le cadre de cette recherche.

Explosifs de sureté allemands

Les explosifs de sureté allemands (*Westfalite, Donarite*) apparaissent nettement plus nitratés et perchloratés que les autres explosifs d'artillerie allemands analysés, ce qui est cohérent s'agissant d'explosifs nitrés nitratés (à base de nitrate d'ammonium). Toutefois les teneurs en ions perchlorate restent faibles (majoritairement inférieures à 1 $mgClO_4^-.kg^{-1}$ MS), avec une grande variabilité des teneurs en espèces azotées [NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+] (oscillant dans la gamme 100 à 10 000 $mg.kg^{-1}$ MS) (cf. Figure 54 et Figure 55). L'occurrence d'ions chlorate et perchlorate dans ces explosifs standards allemands ne trouve aucune explication dans la documentation et les archives consultées dans le cadre de cette recherche.

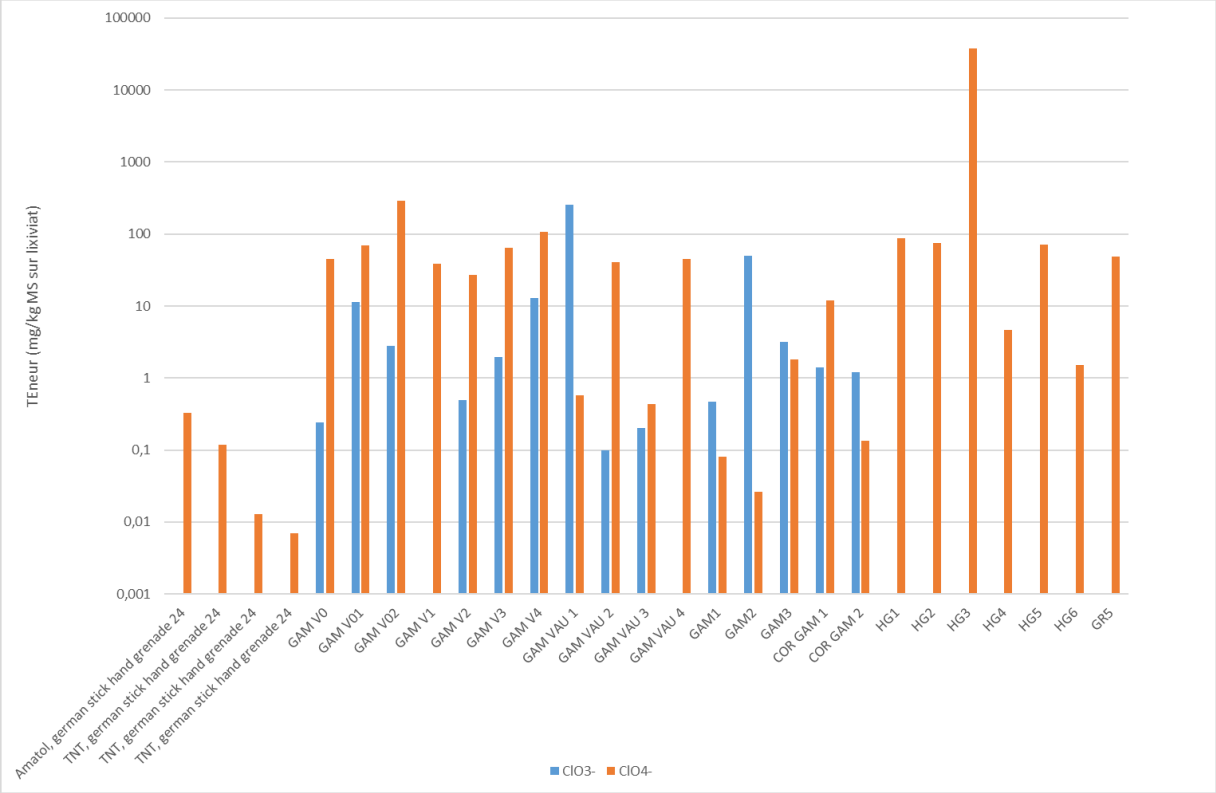


Figure 53 : Teneurs en chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-) des échantillons d'explosifs provenant de grenades à manche allemandes.

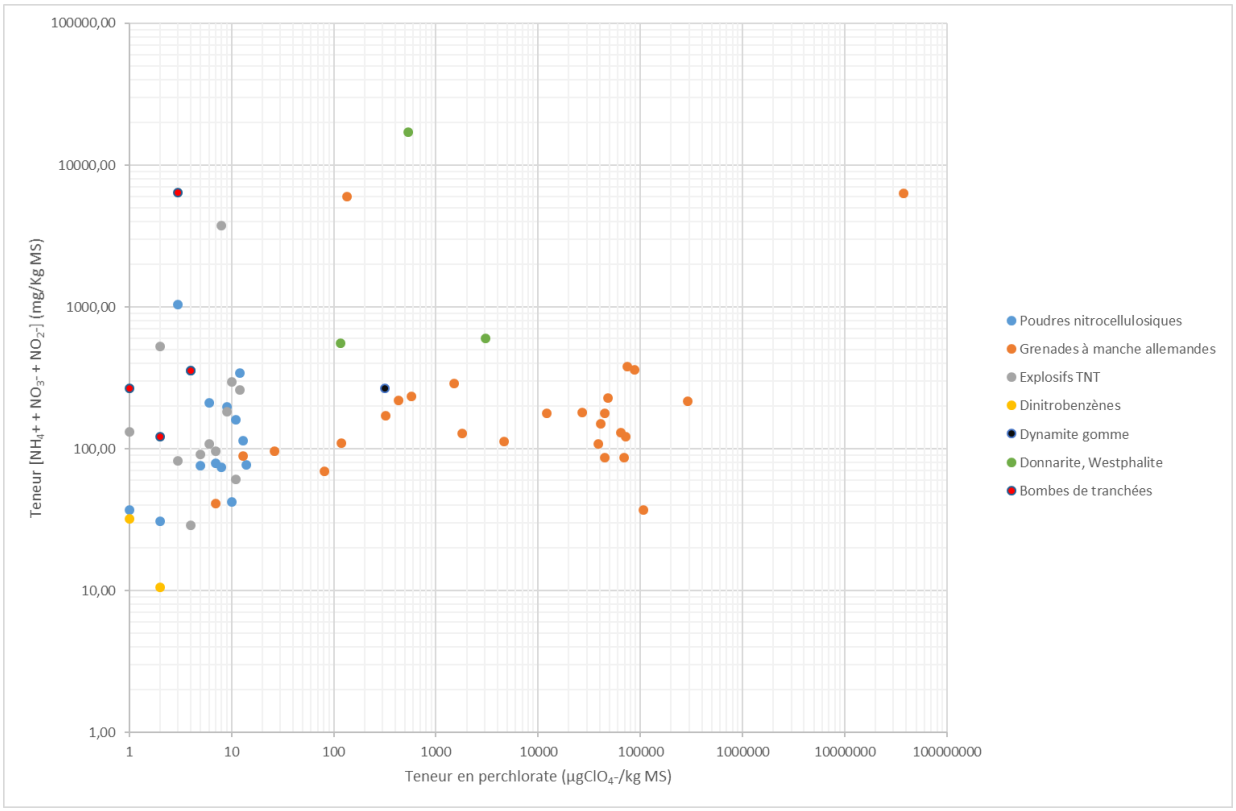


Figure 54 : Teneurs en [NH_4^+ + NO_3^- + NO_2^-] versus teneurs en ClO_4^-.

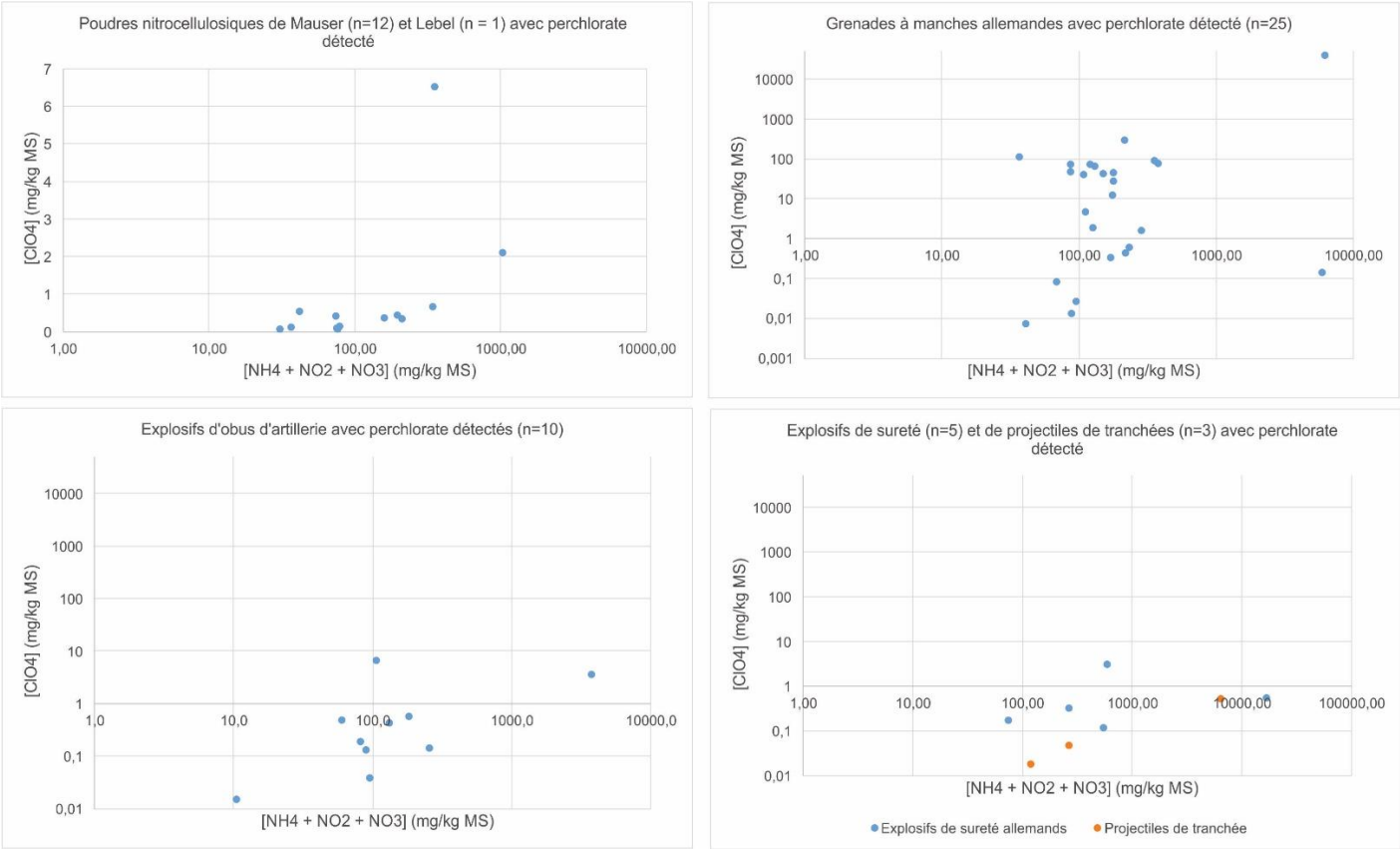


Figure 55 : Teneurs en [NH_4^+ + NO_3^- + NO_2^-] versus teneurs en ClO_4^- par catégorie de poudres et explosifs.

Explosifs de projectiles d'artillerie

Les ions perchlorate sont détectés généralement à l'état de traces dans des explosifs apparentés à du TNT. Les plus fortes teneurs ne dépassent pas 6,4 $mgClO_4^-.kg^{-1}$ MS dans l'échantillon TNT1 dont la teneur en espèces azotées est de l'ordre de 100 $mg.kg^{-1}$ MS ($\sum NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+$). Pourtant avec 952 $gTNT.kg^{-1}$ MS, l'échantillon s'apparenterait à du TNT quasiment pur. L'échantillon TNT3 montre avec environ 3,5 $mgClO_4^-.kg^{-1}$ MS la seconde teneur la plus élevée pour des échantillons apparentés à du TNT. Ce dernier affiche, avec $|NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+]$ d'environ 3,7 $g.kg^{-1}$ MS, un caractère nitraté sans qu'il soit possible de le qualifier d'*Amatol* franc. Cet échantillon montre en effet des teneurs en NAC de l'ordre de 635 $g.kg^{-1}$ MS (dont 510 $gTNT.kg^{-1}$ MS associé à des isomères des di- et tri-nitronaphtalènes).

Les explosifs explicitement perchloratés

En ce qui concerne les explosifs apparentés à la famille des (per)chloratés, les résultats sont les suivants. Les *Perdites* ne montrent pas étonnement de teneurs très élevées en perchlorate, n'excédant pas les 40 $mgClO_4^-.kg^{-1}$ MS. L'explosif du 58T présente toutes les caractéristiques d'un explosif perchloraté avec ses cristaux et des analyses titrant à 3,8 $gClO_4^-.kg^{-1}$ MS. Les *Cheddites* de l'Argonne sont sans surprise, car essentiellement composées de chlorate (jusqu'à 738 $gClO_3^-.kg^{-1}$ MS) de sodium (jusqu'à 143 $gNa^+.Kg^{-1}$ MS) (cf. Figure 56), ce qui est en accord avec les données issues des archives. A noter que les *Cheddites* montrent des teneurs très élevées en sulfates (jusqu'à 41,3 $gSO_4^{2-}.kg^{-1}$ MS) probablement en lien avec l'acidification sulfurique des bains d'électrosynthèse. Il s'agit probablement d'un *Explosif S*.

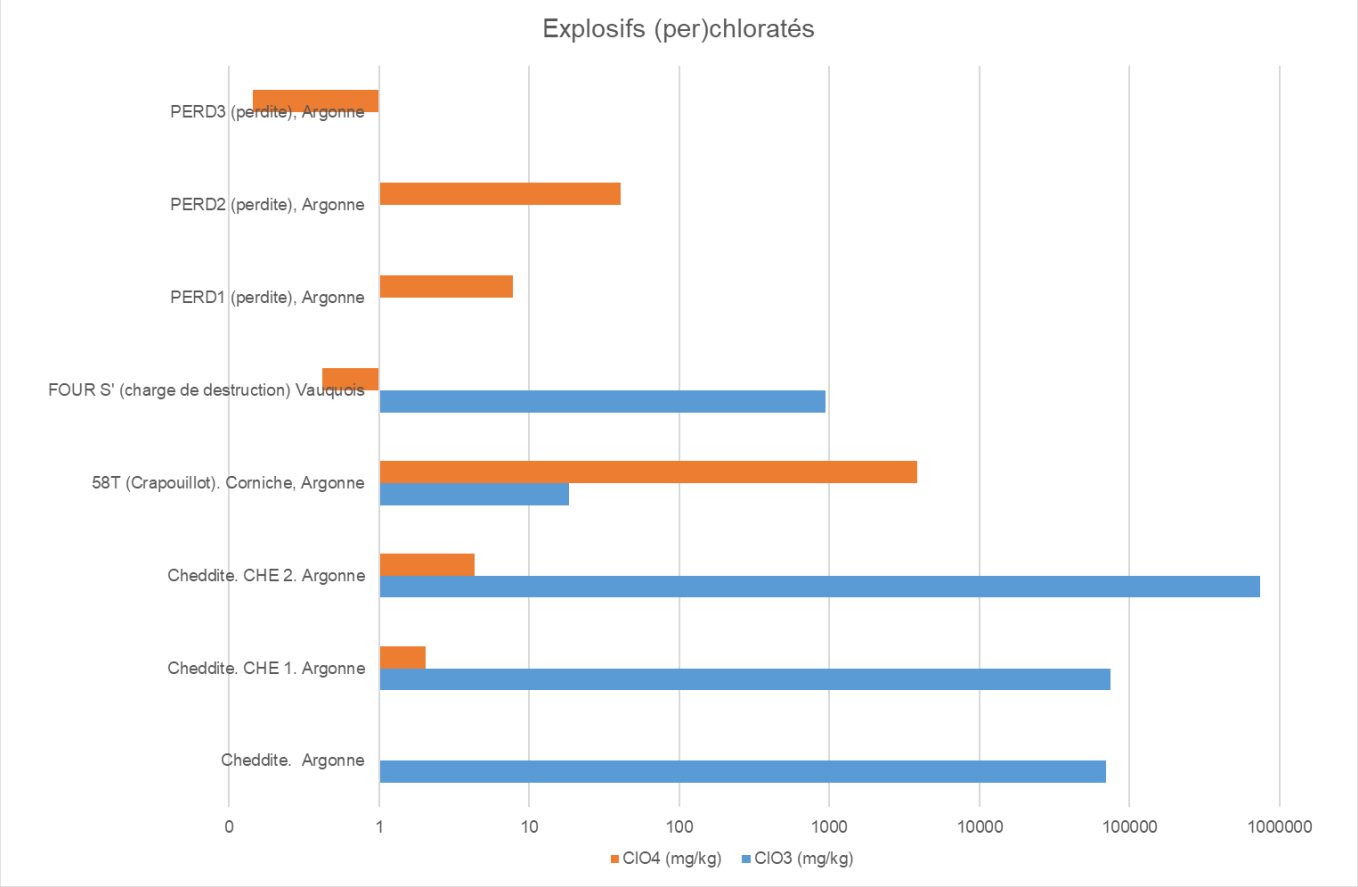


Figure 56 : Teneurs en chlorate et perchlorate dans des explosifs (per)chloratés collectés.

Relation entre NO_3^- et NH_4^+

Les relations entre ammonium et nitrate ont été explorées sur ces échantillons pour valider ou non l'occurrence de nitrate d'ammonium dans les explosifs comme indiqué dans les documents d'archives au sujet de la composition des explosifs nitrés nitratés allemands. La charge électrique de l'ammonium (1+) ne semble pas équilibrer celle des nitrates (1-). L'ammonium apparait pour l'essentiel des échantillons d'explosifs des grenades à manche et autres explosifs de projectiles d'artillerie surnuméraire (en terme d'apport de charges) aux faibles teneurs en espèces azotées (inférieure à 50 mg $NO_3^-.kg^{-1}$ MS) par rapport aux nitrates (alors que l'ammonium s'oxyde rapidement en nitrates en conditions environnementales aérobies), qui par contre sont toujours excédentaires dans les poudres propulsives analysées (cf. Figure 57). Il est probable que d'autres anions viennent compenser les charges électriques positives de l'ammonium, comme les sulfates SO_4^{2-} (jusqu'à 279 $mgSO_4^{2-}.kg^{-1}$ MS dans la *Donarite*) et/ou les chlorures (jusqu'à 880 $mgCl^-.kg^{-1}$ MS dans l'explosif du projectile Cellerier) dont la présence est avérée dans les explosifs nitrés nitratés.

L'excès de nitrates (NO_3^-) par rapport à l'ammonium pour les plus fortes teneurs en azote dans les poudres nitrocellulosiques est cohérent avec le comportement de la nitrocellulose qui a tendance avec le temps à exsuder l'acide nitrique (HNO_3) excédentaire.

Les nitrites, ont été recherchés dans 33 échantillons et ont été quantifiés dans 24 échantillons avec des teneurs jusqu'à 1 046 $mgNO_2^-.kg^{-1}$ MS. Ces teneurs très élevées accompagnent celles en nitrates (5 400 mg $NO_3^-.kg^{-1}$ MS) dans un explosif de projectile d'artillerie de tranchée français (PNIC).

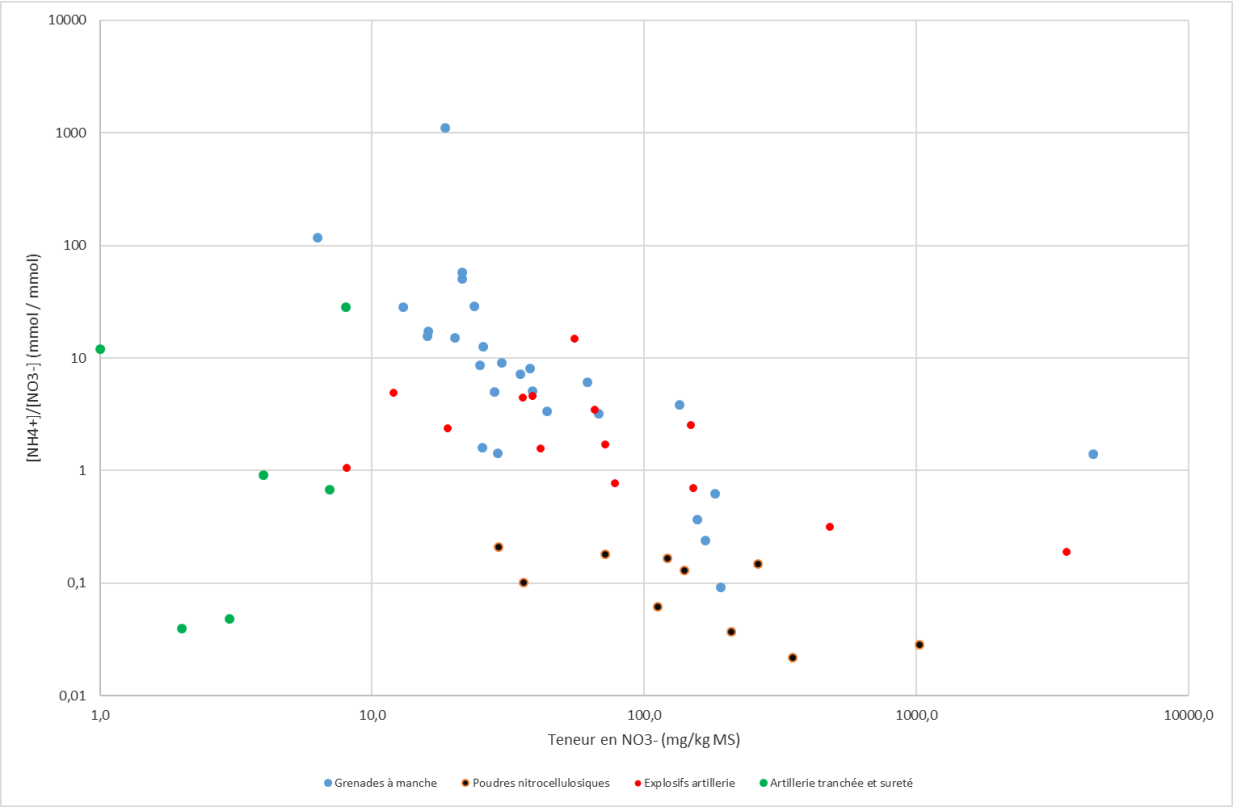


Figure 57 : Rapport [NH_4^+ / NO_3^-] (mmol/mmol) versus teneurs en NO_3^-.

- **Les composés nitroaromatiques (NAC)**

Screening de recherche systématique des liaisons organiques par CPG-MS

Les analyses sur les échantillons de poudres et d'explosifs montrent la présence d'un spectre de NAC bien plus vaste que celui affiché dans la documentation officielle sur les formulations. Les pics de GC-MS (cf. Tableau 13) mettent en évidence la présence de nombreux isomères du TNT et du DNT. Les espèces qui prédominent en fréquence sont le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) et le 2,4-dinitrotoluène (2,4-DNT). Les analyses quantitatives montrent que le 2,4-DNT peut constituer jusqu'à 66% en masse de l'explosif des grenades à manche analysé.

La plus grande diversité d'espèces nitroaromatiques a été mise en évidence par *screening* CPG-MS dans les grenades à manche allemandes ; s'associent au 2,4,6-trinitrotoluène (TNT), le 2,3,4-trinitrotoluène et au 2,4-dinitrotoluène les isomères 2,6-dinitrotoluène, 3,4-dinitrotoluène. Des traces de 1,3,5-trinitrobenzène (impureté de fabrication du TNT), 1,2-dinitrobenzène, 1,3-dinitrobenzène, 1,4-dinitrobenzène, 1,5-dinitronaphthalène et 1,8-dinitronaphthalène ont aussi été mis en évidence dans certains échantillons d'explosifs de grenades à manche. Certains explosifs de projectiles d'artillerie à base de TNT s'avèrent complexes et marqués par une grande diversité de NAC avec en particulier les isomères des di- et tri-nitronaphtalènes et des dinitrotoluènes. Les analyses quantitatives sur un jeu réduit d'échantillons mettent toutefois en exergue l'existence d'explosifs d'artillerie allemands dominés par le 1,3-dinitrobenzène (1,3-DNB) (jusqu'à 75 % de l'explosif en masse) alors associé à de nombreux isomères de di- et tri-nitronaphtalènes (TNT2, TNT3).

L'analyse par lixiviation d'un échantillon de *Perdite* par le LHN montre que le 2,4-dinitrotoluène prédomine parmi les composés organiques, associé au 2,4,6-TNT. Ce résultat converge avec les formulations de *Perdite* identifiées dans les archives et documents de référence (72 % nitrate d'ammonium, 10 % perchlorate de potassium, 3 % de sciure de bois et 15 % DNT + TNT[262]).

Les stabilisants N-nitrosodiphénylamine, diphénylamine, 2-nitrodiphénylamine, 4-nitrodiphénylamine ont été identifiés dans les poudres nitrocellulosiques françaises (Lebel) comme allemandes (Mauser).

Analyses quantitatives au laboratoire sur 13 échantillons d'explosifs allemands (Envilytix GmbH)

Les teneurs en NAC de 13 échantillons d'explosifs (dont neuf issus de grenades à manche allemandes (série GAM), un résidu d'explosif de sureté (RAD) et trois explosifs issus de projectiles d'artillerie) ont été quantifiées par le laboratoire Envilytix. La Figure 58 résume les principaux résultats obtenus. On constate que seul deux échantillons, correspondant à des explosifs de projectiles d'artillerie, possèdent, avec plus de 80% de NAC, une signature d'explosif nitré, l'un largement dominé par le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT), le second par le 1,3-dinitrobenzène (DNB). Le restant possède une fraction en NAC inférieure à 60%.

[262] Haas, R., Thieme, J. (1996). *Lexikon der deutschen Explosivstoffmischungen,* op. cit.

Sur ces explosifs, la fraction en espèces azotées (majoritairement NO_3^- , NH_4^+) n'excède pas 3,7%, un pourcentage ne permettant pas de boucler le bilan massique sur ces échantillons. Parmi ces échantillons d'explosifs, aucun *Amatol* franc n'a donc pu être identifié.

A noter la présence systématique des isomères des di- et tri-nitronaphtalènes (DNN, TNN) des explosifs de projectiles d'artillerie à base de dinitrobenzène. Deux catégories d'explosifs se détachent parmi ceux des grenades à manche allemandes (i) les explosifs nitrés dominés par les dinitrotoluènes (et en particulier le 2,4-dinitrotoluène), (ii) les explosifs nitrés dominés par le TNT (deux échantillons). A noter sur ces deux derniers échantillons la présence de tout ou partie des deux isomères des amino-dinitrotoluène (ADNT), métabolites de biotransformation du TNT. Quant aux résidus d'explosifs de sureté allemands provenant de la galerie *Raderstollen* à Vauquois est, ils montrent à part quasiment également l'occurrence de TNT, DNT et DNN.

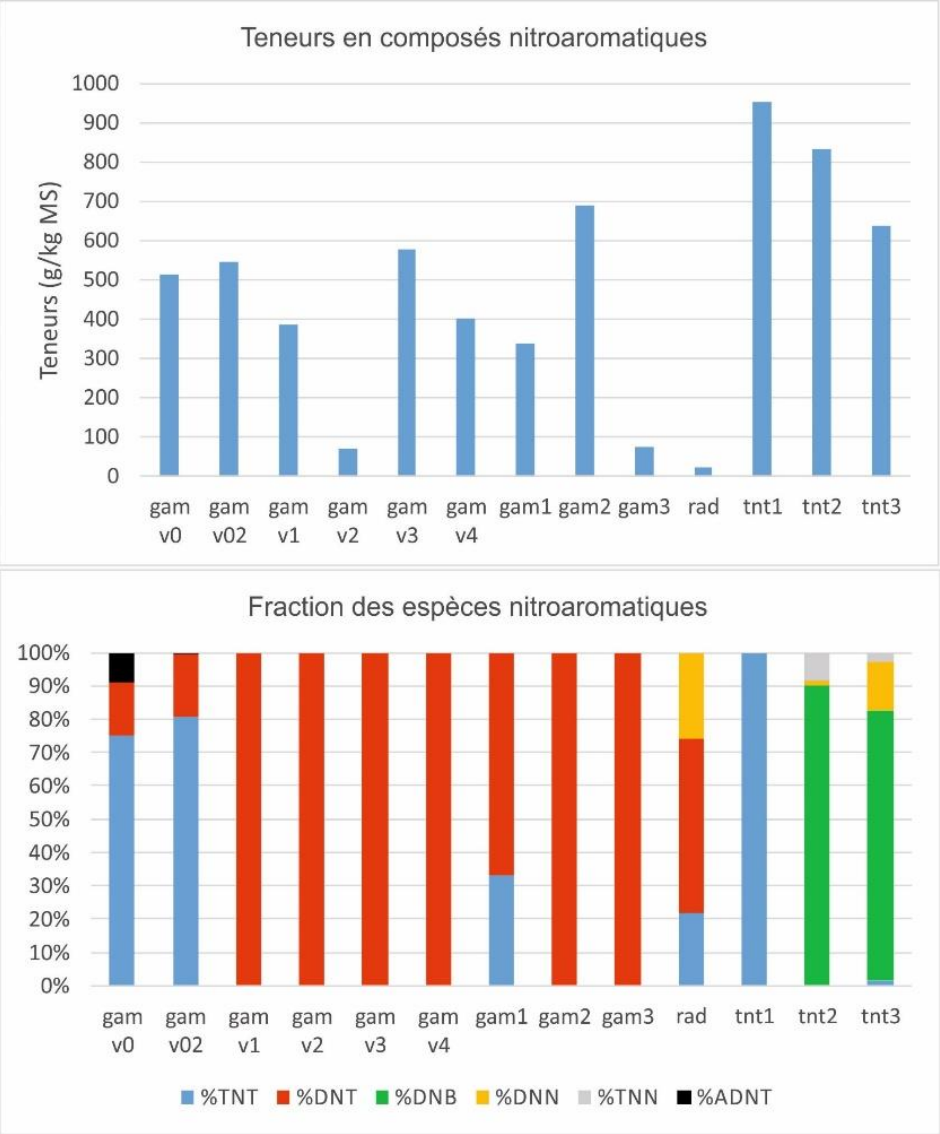


Figure 58 : Analyses quantitatives de 13 échantillons d'explosifs (Envilytix GmbH).

Composé	Origine, famille	Acronyme	DYN	Cheddite (France)	58T	FOUR S	Westphalite (Berlin)	Donarite (Fille Morte)	Donarite (Bois des Chevaliers)	Leb2 (France)	M7	DNB	Gam1	Gam2	Gam3	Gam COR	Gam COR 2	Gam VAU 1	Gam VAU 2	Gam VAU 3	Gam VAU 4	MAG	PIC (mélinite) (France)	TNN 1	TNT 1	TNT 2	TNT 3	TNT 4	TNT 5	TNT 6	TNT 7
Analyses isotopiques C, N (université du Delaware)														O											O	O					
			Dynamite -gomme (France)		Explosif perchloraté (France)	Emplacement d'une charge de destruction française	Explosifs de sureté allemands, fourneaux de mine			Poudres propulsives d'armes portatives		Grenades à manche allemandes et chargement d'obus																			
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Métabolites du TNT et DNT	2-ADNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	x	x	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
4-Amino-2,6-dinitrotoluène		4-ADNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
4-Amino-2-nitrotoluène		4-A-2-NT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2,4,6-trinitrophénol	Explosif	2,4,6-TNP	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3,5-Dinitroaniline	Explosif	3,5-DNA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2,3-dinitrotoluène	Explosifs, propulseurs et métabolites du TNT	2,3-DNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2,4-Dinitrotoluène		2,4-DNT	nd	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	x	x	x	nd	x	x	x	x	x	x	x	nd	x	x	nd	x	x	x	x	x
2,5-Dinitrotoluène		2,5-DNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2,6-Dinitrotoluène		2,6-DNT	nd	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	nd	x	x	nd	x	x	x	nd	nd	nd	x	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3,4-Dinitrotoluène		3,4-DNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3,5-Dinitrotoluène		3,5-DNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
1,3,5-Trinitrobenzène	Impureté du DNB et TNT	1,3,5-TNB	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	x	x	x	x	nd
2,4,6-Trinitrotoluène	Explosif	TNT	nd	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	x	x	x	x	x	nd	x	nd	nd	x	x	x	x	x
2,4,5-Trinitrotoluène	Impureté du TNT	2,4,5-TNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	x	x
2,3,4-trinitrotoluène		2,3,4-TNT	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd
1,2-Dinitrobenzène	Explosif	1,2-DNB	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd
1,3-Dinitrobenzène		1,3-DNB	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	x	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd
1,4-Dinitrobenzène		1,4-DNB	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x		nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd
2-Nitroaniline	Intermédiaires de synthèse	2-NA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3-Nitroaniline		3-NA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
1-Nitronaphthalène	Intermédiaires de synthèse du DNN	1-NN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd
2-Nitronaphthalène		2-NN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	x
1,3-Dinitronaphthalène	Explosifs	1,3-DNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
1,5-Dinitronaphthalène		1,5-DNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	nd
1,6-Dinitronaphthalène		1,6-DNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	x
1,8-Dinitronaphthalène		1,8-DNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	nd
1,3,5-Trinitronaphthalène		1,3,5-TNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	nd
1,3,8-Trinitronaphthalène		1,3,8-TNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	nd
1,4,5-Trinitronaphthalène		1,4,5-TNN	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd
Nitroglycérine	Explosif, propulseur	NGL	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
N-Nitrosodiphénylamine	Stabilisants et sous-produits	N-NDPhA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Diphénylamine		DPhA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2-Nitrodiphénylamine		2-NDPhA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
4-Nitrodiphénylamine		4-NDPhA	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

nd	Non détecté
x	Pic(s) majoritaire(s)
x	Traces (pics secondaires)

Tableau 13 : Résultats du screening de recherche systématique des liaisons organiques (Envilytix GmbH).

Analyses des quatre échantillons d'explosifs issus d'obus de 75 mm du gouffre de Jardel. Octobre 2000.

Les analyses réalisées ont permis de mettre en évidence dans les quatre différents prélèvements effectués (a, b, c, d) la présence :

a) D'ions calcium, d'acide picrique (explosif dénommé *Mélinit*e, correspondant au 2,4,6-trinitrophénol), de dinitronaphtalène qui sert de flegmatisant (pour diminuer la sensibilité des explosifs aux chocs et à la friction) ;

b) D'acide picrique, d'ions nitrate, ammonium, magnésium et calcium, ainsi que de carbonates et d'un silicate ;

c) 90 % d'acide picrique et de 10 % d'huile minérale (paraffine) comme flegmatisant. Ce chargement correspond à l'explosif dénommé *M P*, le plus utilisé pour le chargement en comprimé des obus pendant la Première Guerre mondiale. Il est théoriquement constitué de 88 % de *Mélinite* et de12 % de paraffine mais ce résultat est conforme, compte tenu des tolérances de fabrication en période de guerre ;

d) 59 % d'acide picrique et 41 % d'isomères du dinitronaphtalène comme flegmatisant. Ce chargement correspond à la définition de l'explosif dénommé *M Dn*, constitué de 70 % de *Mélinite* et 30 % de dinitronaphtalène utilisé pour le chargement en fondu ou en comprimé des obus. Ici encore, ces résultats sont conformes aux « cahiers des charges » du chargement des munitions, compte tenu des tolérances de fabrication en période de guerre.

Il est possible que la présence d'ions calcium, magnésium, les silicates identifiés proviennent de l'environnement de l'obus au sein du gouffre de Jardel. Toutefois, l'analyse de *Mélinite* provenant d'une gaine-relai d'obus de 155 mm français (modèle 1898) révèle la présence de ces ions, en association avec l'acide picrique. Calcium, magnésium et silice ont aussi été mis en évidence dans des échantillons d'explosifs de grenades à manche allemandes collectés en Argonne (cf. Annexe A). Les ions chlorate et perchlorate n'ont pas été recherché.

Possibilité et limites de l'approche par échantillonnage et l'analyse au laboratoire

Premièrement, les échantillons, au nombre bien qu'élevé de 72, ne sauraient être représentatifs de la grande diversité des compositions des explosifs de la Grande Guerre qui ne cessèrent d'évoluer comme la présente recherche historique le démontre. Ensuite, ces échantillons ont été constitués en les prélevant dans des engins fortement corrodés, pour certains fracturés, exposés aux conditions environnementales, sur des sites où ils furent abandonnés voire neutralisés, détruits, à la fin de la guerre puis dans l'entre-deux-guerres. Les compositions reflètent certainement en partie celles de certains explosifs des engins de guerre résiduels allemands de la fin de la guerre. Aucun explosif provenant de munitions britanniques n'a été constitué faute de pouvoir avoir accès à ces derniers. Le nombre d'échantillons provenant de matériels français est aussi limité. Les échantillons d'explosifs provenant du gouffre de Jardel ont été constitués sur des obus français d'artillerie de campagne d'un même calibre en nombre très limité au regard de la diversité des calibres au sein de ce dépôt. Les compositions à base de *Mélinite* identifiées ne peuvent être généralisées aux chargements des autres projectiles de calibres différents présents dans ce site d'enfouissement.

Conclusions et discussions

- **Synthèse et conclusions**

Cette approche confronte, sur un lot certes restreint mais exceptionnel d'échantillons, (i) les informations livrées par les sources d'archives, établies sur la base des connaissances scientifiques du moment et surtout sur ce qu'industriels et les Etats-Majors de tous les camps en charge de l'armement souhaitaient documenter officiellement, et (ii) ce que révèlent les nouveaux outils métrologiques, analytiques et isotopiques.

Les résultats issus de la caractérisation chimique analytique des poudres et explosifs montrent sans conteste des points de convergence mais aussi de divergence avec ce qui est renseigné dans les archives.

En résumé, se dégagent de ces recherches analytiques sur des échantillons d'explosifs essentiellement allemands, trois grandes catégories d'explosifs :

- Explosifs dont la composition est dominée par le 2,4,6-TNT dans les chargements de munitions d'artillerie de campagne et lourde allemandes. Rarement pur, le TNT est associé à de très nombreuses impuretés, notamment des di- et tri-nitronaphtalènes, le 2,4-DNT et le 1,3,5-trinitrobenzène. Nitrate et ammonium sont par ailleurs présents dans ces explosifs avec des teneurs variables selon les échantillons. Un seul échantillon (TNT3) possédant une signature franche et typique d'*Amatol* (TNT + NH_4NO_3) a été identifié par les analyses au laboratoire ;

- Explosifs dont la composition est dominée par le 2,4-dinitrotoluène (2,4-DNT) ; il s'agit essentiellement des explosifs des grenades à manche allemandes et des explosifs de sureté des fourneaux de destruction. Le 2,4-DNT est quasiment systématiquement associé au TNT et pour certains échantillons à une large variété de composés parmi lesquels les isomères des DNB, des mono-, di- et tri-nitronaphtalènes**.** Ces explosifs présentent donc cette singularité d'être marqués par des produits de mono-, di- et tri-nitration d'hydrocarbures mono- et bi-aromatiques. Ces NAC sont associés dans des proportions variables aux nitrates et/ou à l'ammonium. Ces explosifs des grenades à manche se singularisent aussi par ailleurs par la présence, inattendue, et systématique d'ions perchlorate à des teneurs variables pouvant excéder $3 gClO_4^-.kg^{-1}$ MS. Les ions chlorate sont également présents dans certains échantillons mais à des teneurs moindres comparativement aux ions perchlorate. Il n'apparaît aucune corrélation significative entre les teneurs en ions perchlorate et celles en espèces azotées ;

- Les explosifs dont la composition est dominée par le 1,3-dinitrobenzène (1,3-DNB), qui semble être principalement associé au di-nitronaphtalènes ; ces composés sont produits par le même stade de dinitration. Il convient de souligner ici, qu'aucune formulation d'explosif français ou émanant de l'industrie alliée n'a été identifiée, dans laquelle les isomères du DNB sont explicitement affichés. Ils ne dérivent pas de la transformation environnementale d'autres NAC. Les DNB peuvent à ce titre être considérés comme des traceurs des explosifs allemands de la Grande Guerre. L'association des DNB, DNN et TNN est caractéristique des chargements explosifs de certaines munitions allemandes à *Croix bleue* à arsines de la fin de la guerre au regard des archives consultées ;

- Les explosifs chloratés français montrant entre 1 et 4 $gClO_3^-.kg^{-1}$ MS et une pauvreté en espèces azotées, la matrice étant majoritairement constituée de paraffine, dont la

présence est attestée visuellement par le comportement de l'explosif à la chaleur (fusion) et par les screening de recherche des liaisons organiques au laboratoire. Il s'agit de *Cheddites* à base de chlorate de sodium (comme l'*Explosif S*) ;

- Les explosifs explicitement perchloratés, francs, comme les *Perdites* allemandes (formulations dans lesquelles $KClO_4$ est associé à de nombreux composés nitromaromatiques, majoritairement le 2,4-dinitrotoluène) et l'explosif du projectile d'artillerie de tranchée français 58T « Crapouillot ». Ce dernier avec 3,8 $gClO_4^-$ et 2,5 gNH_4^+ (et seulement 25 mg NO_3^-/kg MS) présente des caractéristiques chimiques proches des explosifs français *Ch 86 /14* à base de perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4);

- Les explosifs des obus français de 75 mm du gouffre de Jardel possèdent des compositions caractéristiques des explosifs à base de *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol) ayant chargé les projectiles de l'artillerie de campagne française durant la Première Guerre mondiale, de formulations conformes aux renseignements tirés des sources historiques. Ils associent la *Mélinite* à des flegmatisants (DNN).

- Quant aux poudres propulsives nitrocellulosiques des cartouches d'armes portatives allemandes Mauser, elles apparaissent stabilisées par des phénylamines et des nitrodiphénylamines, conformément aux renseignements archivistiques.

Les deux principaux résultats analytiques montrant des compositions d'explosifs inattendues et s'écartant des formulations renseignées dans les archives sont les suivants (i) l'occurrence d'ions perchlorate dans les explosifs nitrés et nitratés, de façon quasi systématique dans les explosifs des grenades à manche allemandes avec des teneurs ponctuellement élevées, (ii) le chargement explosif singulier des grenades à manche allemandes marqué par des produits de mono-, di- et tri-nitration d'hydrocarbures mono- et bi-aromatiques formant des mélanges d'une grande complexité.

Les ions perchlorate ont été identifiés dans des échantillons d'explosifs explicitement perchloratés, avec des compositions pouvant être expliquées par des formulations renseignées dans les archives. Mais la présence de ces ions de façon systématique dans les échantillons d'explosifs de grenades à manche et des ergols des cartouches d'armes portatives Mauser allemandes, et plus ponctuellement, dans des explosifs standards de sureté ou apparentés à du TNT des chargement d'obus d'artillerie, est une surprise. Les teneurs mesurées, inattendues, sont très variables, s'inscrivant dans une gamme entre 10 µgClO_4^-/kg MS et 3 800 000 µgClO_4^-/kg MS, (pour une limite de quantification de 5 µgClO_4^-/kg MS). Il ne se dégage aucune corrélation significative entre les teneurs en espèces azotées analysées ([NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+]) et celles en ions perchlorate ce qui est un indice que possiblement les ions perchlorate ne seraient pas directement liés à l'azote dans les échantillons analysés. La présence de perchlorate dans les explosifs chargeant les munitions d'artillerie lourde et de campagne est étonnante, les informations contenues dans les archives précisant à quel point ces sels étaient redoutés des industriels des poudres et explosifs et plus encore de l'Artillerie, car impropres, de par leur sensibilité aux chocs et à la friction, au chargement et aux usages courants de ces projectiles.

Si la présence d'ions perchlorate dans les chargements explicitement (per)chloratés, comme ceux de grenades, projectiles de tranchée et fourneaux de destruction français (à base d'explosifs *Cheddite* et *Percheddite* (per)chloratés), et certains équivalents allemands (chargés de *Perdite* notamment) ne fait aucun doute, ces résultats analytiques montrent que ces ions peuvent être attendus en impuretés dans une bien plus vaste gamme de chargements et donc dans des munitions autres que celles explicitement (per)chloratées.

- **Hypothèse concernant le chargement explosif hétérogène des grenades à manche allemandes**

La présence au sein d'une même composition d'explosif de NAC d'une très grande diversité, mais surtout montrant des signatures mono-, di- et tri-nitrés, est atypique des compositions des explosifs nitrés standards. Les dinitrobenzènes, dinitronaphthalènes, le trinitroanisol ou encore les trinitronaphthalènes étaient chez les Allemands des *Ersatzsprengstoffe*, des explosifs de substitution (au TNT et à l'acide picrique) produits vers la fin de la guerre. L'occurrence au côté du 2,4,6-trinitrotoluène d'autres isomères du TNT est aussi surprenante sachant que le 2,4,6-TNT subit plusieurs phases de lavage à grande eau dans le but de garantir sa pureté. L'explication la plus vraisemblable pour expliquer ces assemblages serait à rechercher dans la situation de l'industrie des poudres et explosifs allemande de la fin de la guerre, en proie à une pénurie en matières premières. Afin d'économiser les explosifs réglementaires, réservés aux munitions de l'Artillerie, dont le chargement devait répondre à un cahier des charges strict pour sécuriser leur usage, les industriels des munitions eurent recours à des explosifs civils de sureté (de mines et carrières, du génie civil) pour le chargement des grenades et autres projectiles d'artillerie de tranchée.

Certains documents d'archives montrent que des déchets et effluents provenant de la production du TNT et des dinitrotoluènes auraient aussi été avantageusement utilisés pour ces chargements comme décrit par le Lieutenant Général M. Schwarte (1920) « *Ferner wurden für gewisse Geschosse, und besonders Nahkampfmittel = Kampfwaffen, ähnlich zusammengesetzt Sprengstoffe wie die Sicherheitsprengstoffe des Bergbaues in gestoptes Form genützt. Die Herstellung dieser Sprengstoffe bot den Vorteil, dass die Abfallnitrokörper das flüssige Trinitrotoluol, unreine Dinitroverbindungen, hierfür Verwendung finden konnten. Die Sprengstoffe wurden durch innige Mischung der Komponenten innetmaschinen hergestellt ; Anfang war der Mischung 4% Nitroglycerin zugesetzt ; später wurde das Donarit aus etw 80% Ammonsalpeter, 18% Nitrokörper und 5% Holzmehl gefertigt. Schwieriegkeiten verursachte dauern die Beschaffung des Nitrokörper, und je nach ihrer Herstellungsmöglichkeiten werden die verschiedene Nitroverbindungen für die Herstellung der Ammonsalpetersprengstoffe benutzt. Die fanden für Pioniermunition, zur Füllung von Minen und Wurfminen, sowie in Handgranaten, in gestoften Form Verwendung*[263] *».*

[263] « En outre, des explosifs similaires à ceux utilisés en exploitation minière, comme les explosifs de sureté, ont été utilisés sous forme comprimée dans certains projectiles et en particulier dans l'artillerie de tranchée. La production de cet explosif présentait l'avantage de trouver une application aux déchets des composés nitrés du trinitrotoluène aqueux, les composés dinitrotoluènes impurs. Les explosifs ont été produits par un mélange intime des composants ; initialement le mélange était obtenu par l'ajout de 4% de nitroglycérine ; plus tard, la Donarite était confectionnée avec environ 80% de salpêtre d'ammonium, 18% de composés nitroaromatiques et 5% de sciure de bois. La difficulté récurrente était celle de l'approvisionnement en composés nitroaromatiques, et selon les possibilités de production, les différents composés nitroaromatiques ont été utilisés pour la fabrication des explosifs au salpêtre d'ammonium. Ils trouvèrent des utilisations pour le chargement sous forme comprimée des munitions d'artillerie d'infanterie, de mines et torpilles aériennes, ainsi que dans les grenades à main ». Schwarte, M. (1920). Generallieutnant. Und Mitwirkung von 45 Technichen und militarischen fachwissenschaftlichen Mitarbeitern. *Die Technik im Weltkriege*. Berlin, 1920.

L'usage de déchets de production et d'explosifs impurs de piètre qualité vers la fin de la guerre dans le but de réserver à l'Artillerie les productions aux spécifications les plus exigeantes (en terme de stabilité), serait une explication cohérente permettant d'expliquer la très grande diversité des NAC constatée dans les chargements des grenades allemandes majoritairement chargées en TNT et DNT.

- **Hypothèses concernant l'occurrence inattendue d'ions perchlorate dans les explosifs nitrés**

L'origine des ions perchlorate identifiés dans les explosifs nitrés / nitratés et les poudres nitrocellulosiques ne trouve aucune explication dans les archives consultées dans le cadre de cette recherche historique. Trois hypothèses peuvent être avancées à ce stade de la recherche:

- Les sels de perchlorate d'origine synthétique auraient été intentionnellement combinés aux composés nitrés et/ou nitratés des chargements explosifs. Dans ce cas de figure, les sels perchloratés auraient une origine synthétique. L'addition de ces sels hautement énergétiques permettrait de toute évidence, sur le plan purement pyrotechnique, d'augmenter la puissance et la brisance des explosifs. Cette hypothèse semble plausible, notamment pour les explosifs des grenades à manche allemandes de la fin de la guerre, de piètre qualité ;

- Les sels de perchlorate seraient des impuretés résiduelles liées à l'usage de nitrate du Chili ou d'acide nitrique dérivé des nitrates chiliens dans les procédés de fabrication des poudres et explosifs nitrés, nitratés. Les sels de perchlorate ClO_4^- seraient associés à l'azote apporté sous forme d'acide nitrique HNO_3 dans la synthèse des NAC (par sulfonitration) et la conversion du $(NH_4)_2SO_4$ (usine à gaz et cokerie) en NH_4NO_3 (entrant dans la composition des *Amatols* et explosifs nitratés). La formation d'acide perchlorique au sein de l'acide nitrique concentrée serait possible au contact de l'acide sulfurique concentrée et de l'oléum anhydre. Dans ce cas de figure les perchlorates seraient naturels. En absence de corrélation significative entre les teneurs en ions perchlorate et celles en espèces azotées sur les échantillons analysés, cette hypothèse ne peut être privilégiée à ce stade de la recherche ;

- Une autre piste qui mériterait d'être explorée est celle de la genèse fortuite d'ions perchlorate dans les procédés industriels de synthèse des nitrates par fixation de l'azote atmosphérique. Les procédés en question (procédé Birkeland Eyde) utilisés durant la Première Guerre mondiale pour la production d'ammoniac ($NH_{3\ gaz}$), puis de nitrates par oxydation de ce gaz (par le procédé Oswald), consistaient à placer un volume d'air donné sous un arc électrique à haute température (~3 000 °C) pouvant conduire à l'oxydation du chlore et/ou des chlorures présents dans l'air en ions perchlorate selon une schéma réactionnel proche ou similaire à celui identifié pour la formation des ClO_4^- naturels dans la haute atmosphère.

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à ces questions ou du moins d'identifier de nouvelles voies de recherches sur les relations entre azote et perchlorate dans la chimie des explosifs de 1914-1918, susceptible (i) de marquer notre environnement mais aussi (ii) d'impacter possiblement sur le plan de la sureté de leurs missions les professionnels du déminage, j'ai pris le parti d'aller au-delà de la chimie analytique sur un nombre restreint d'échantillons, en mettant en œuvre les outils modernes, nouveaux, des analyses isotopiques.

3.3.5 Approche isotopique pour tracer les origines (*Fingerprint*) des ions perchlorate et de l'azote dans les poudres et explosifs de la Grande Guerre

Analyses isotopiques de O, Cl dans ClO_4^- des poudres et explosifs échantillonnés

- **Principe**

L'évolution de la recherche sur les isotopes stables (de l'oxygène et du chlore) au sein de la molécule de perchlorate ClO_4^-, a fourni depuis le début des années 2000 de nouveaux outils qui contribuent à présent à renforcer les méthodes et moyens, par leur couplage avec d'autres approches (analyses chimiques de cortèges de composés accompagnant les perchlorates, approche historique), permettant d'identifier, si possible, les origines et les sources en ions perchlorate marquant l'environnement. Ainsi, des méthodes d'analyse des isotopes stables de O, Cl au sein de ClO_4^- ont été développées pour différencier le ClO_4^- naturel du ClO_4^- synthétique.

Le ClO_4^- est un oxyanion non labile. Une fois formé, ses atomes d'oxygène ne s'échangent plus avec ceux de l'environnement ambiant. Cette molécule très stable est persistante dans les environnements naturels. La composition isotopique des atomes présents au moment de la formation des molécules du ClO_4^- s'est donc imprimée immuablement. Les isotopes de l'oxygène portent en eux la signature (*Fingerprint*) de leur origine, au moment où ils se combinèrent au chlore dans la haute atmosphère lorsqu'il s'agit de perchlorates naturels ou de la décomposition électrochimique de l'eau en présence de chlore (NaCl) sous l'effet de courant électrique de haute intensité lors de leur synthèse industrielle. L'empreinte des conditions de formation des ions perchlorate est portée par les proportions entre les différents isotopes stables de l'oxygène (au sein de la molécule de ClO_4^-) (^{16}O, ^{17}O, ^{18}O). Ces ratios permettant de rendre compte du fractionnement isotopique (ratios delta δ) sont exprimés comme suit:

$$\delta^{18}O(‰) = [(^{18}O/^{16}O)_{sample} - (^{18}O/^{16}O)_{VSMOW} - 1] \times 1000 \qquad \textit{(eq 1)}$$
$$\delta^{17}O(‰) = [(^{17}O/^{16}O)_{sample} - (^{17}O/^{16}O)_{VSMOW} - 1] \times 1000 \qquad \textit{(eq 2)}$$

Où VSMOW est le matériel isotopique de référence (acronyme pour "*Vienna Standard Mean Ocean Water isotopic reference material*"). Pour l'oxygène terrestre, les valeurs de $\delta^{18}O$ et $\delta^{17}O$ sont corrélées selon la relation dépendante de la masse suivante (Young et al., 2002)[264]:

$$\delta^{17}O \approx 0{,}52 \times \delta^{18}O \qquad \textit{(eq 3)}$$

Sur la base de cette relation, le ClO_4^- naturel et synthétique peuvent être différenciés par le calcul de l'écart de la valeur $\delta^{17}O$ vis-à-vis de la ligne de fractionnement terrestre (eq. 3) par la relation:

$$\Delta^{17}O = \delta^{17}O - 0.52 \times \delta^{18}O \qquad \textit{(eq 4)}$$

Plusieurs auteurs ont rapporté des compositions isotopiques du ClO_4^- naturel, et tous ont des valeurs $\Delta^{17}O$ significativement positives. Les premières mesures de la composition isotopique de l'oxygène dans le ClO_4^- synthétique et issu du désert Atacama ont été rapportées par Bao et Gu (2004)[265], qui ont constaté que les valeurs $\delta^{18}O$ du ClO_4^- synthétique étaient de -18,4 ± 1,2 ‰, tandis que celles du désert d'Atacama variaient de -24,8 ‰ à -4,5 ‰.

[264] Young, E. D., Galy, A., & Nagahara, H. (2002). *Kinetic and equilibrium mass-dependent isotope fractionation laws in nature and their geochemical and cosmochemical significance. Geochimica et Cosmochimica Acta,* 66(6). 1095-1104.

[265] Bao, H.; Gu, B. (2004). *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 5073-5077.

Le ClO_4^- d'Atacama est enrichi en ^{17}O (+4,2 ‰ <$\Delta^{17}O$ <+10,5 ‰, cf. Figure 60). Cet enrichissement a été attribué à sa production dans la haute atmosphère par des réactions impliquant l'ozone (Bao et Gu, 2004). D'autres données sur les isotopes stables de l'oxygène dans le ClO_4^- synthétique ont été publiées ultérieurement, montrant que les valeurs de $\delta^{18}O$ dans le ClO_4^- synthétique varient de -24,8 ‰ à -12,3 ‰ et que sa valeur $\Delta^{17}O$ est toujours de 0,0 ± 0,2 ‰ (Böhlke et al., 2005[266] ; Sturchio et al., 2006[267], 2012[268]; cf. Figure 59). La signature isotopique de l'oxygène dans le ClO_4^- synthétique est dérivée de celle de l'eau décomposée durant la synthèse électrochimique, ce qui entraîne un fractionnement dépendant de la masse avec $\Delta^{17}O$ ~ 0 (Böhlke et al., 2017[269]; Sturchio et al., 2006[270]).

Des différences systématiques dans les rapports isotopiques du Cl stable du perchlorate synthétique et naturel sont également observées. Les valeurs de $\delta^{37}Cl$ de ClO_4^- synthétique ont d'abord été rapportées par Ader et al. (2001)[271], Böhlke et al. (2005)[272] et Sturchio et al. (2006), allant de - 5,0 à + 2,3 ‰. Pour le ClO_4^- naturel du désert chilien d'Atacama, les valeurs mesurées de $\delta^{37}Cl$ sont extrêmement négatives, allant de -14,5 ‰ à -9,2 ‰ (Böhlke et al, 2005; Sturchio et al., 2006; Jackson et al., 2010[273]).

---

[266] Böhlke, J. K.; Sturchio, N. C.; Gu, B.; Horita, J.; Brown, G. M.; Jackson, W. A.; Batista, J.; Hatzinger, P. B. (2005). *Perchlorate isotope forensics. Anal. Chem.* 2005, 77, 7838 - 7842.

[267] Sturchio NC, Böhlke J.K., Gu B, Horita J, Brown G.M., Beloso A.D. Jr, Hatzinger P.B., Jackson W.A., Batista J.R. (2006). « Stable isotopic compositions of chlorine and oxygen in synthetic and natural perchlorates » *In Perchlorate Environmental Occurrences, Interactions, and Treatment*. Gu B, Coates J.D. (eds.) Springer, New York.

[268] Sturchio, N.C., Böhlke, J.K., Gu, B., Hatzinger, P.B., Jackson, W.A., (2012). « Isotopic tracing of perchlorate in the environment » In Baskaran, M. (Ed.). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. I. Springer Berlin Heidelberg, pp. 437-452.

[269] Böhlke, J.K., Mroczkowski, S.J., Sturchio, N.C., Heraty, L.J., Richman, K.W., Sullivan, D.B., Griffith, K.N., Gu, B., Hatzinger, P.B., (2017). « Stable isotope analyses of oxygen (^{18}O:^{17}O:^{16}O) and chlorine (^{37}Cl:^{35}Cl) » In *Perchlorate: reference materials, calibrations, methods, and interferences. Rapid Commun. Mass Spectrom*. 31, 85 – 110.

[270] Sturchio, N. C., Böhlke, J. K., Gu, B., Horita, J., Brown, G. M., Beloso, A. D., & Batista, J. (2006). *Stable isotopic composition of chlorine and oxygen in synthetic and natural perchlorate. Perchlorate: environmental occurrence, interactions and treatment*, 93-109.

[271] Ader, M., Coleman, M. L., Doyle, S. P., Stroud, M., & Wakelin, D. (2001). *Methods for the stable isotopic analysis of chlorine in chlorate and perchlorate compounds. Analytical Chemistry*, 73(20). 4946-4950.

[272] Böhlke, et al.,(2005), *op. cit*.

[273] Jackson W. A., Bohlke J. K., Gu B. H., Hatzinger P. B. and Sturchio N. C. (2010). *Isotopic composition and origin of indigenous natural perchlorate and co-occurring nitrate in the Southwestern United States. Environ. Sci. Technol*. 44, 4869-4876.

Outre le ClO_4^- naturel du désert d'Atacama, qui est une occurrence naturelle bien connue de cet ion, d'autres dépôts naturels indigènes de ClO_4^- ont été observés, toujours en milieu aride, en particulier dans le sud-ouest des États-Unis, y compris dans les hautes plaines du sud (Texas) et près de la vallée de la mort (*Death Valley*, Californie) (Jackson et al., 2005[274]; Plummer et al., 2006[275]; Rajagopalan et al., 2006[276]; Rao et al., 2007[277]). Alors que le ClO_4^- du désert d'Atacama a une composition isotopique relativement bien documentée, relativement peu d'études ont été réalisées pour discriminer d'autres sources naturelles de ClO_4^- par des mesures isotopiques en raison des difficultés liées à la collecte et au traitement des échantillons (Sturchio et al., 2011[278]). Le ClO_4^- des hautes plaines du sud a des valeurs de $\Delta^{17}O$ allant de +0,2 ‰ à +2,6 ‰, des valeurs de $\delta^{18}O$ de +0,5 ‰ à +5,1 ‰. La composition isotopique du ClO_4^- de la Vallée de la Mort (*Death Valley*) est quelque peu différente avec des valeurs de $\Delta^{17}O$, $\delta^{18}O$ et $\delta^{37}Cl$ allant de +8,6 ‰ à +18,4 ‰, +2,9 à +26,1 ‰ et -3,1 ‰ à -0,8 ‰ respectivement (cf. Figure 60).

La raison d'une telle large gamme de valeurs de $\delta^{37}Cl$ dans le ClO_4^- naturel n'est pas encore bien comprise, mais elle pourrait être liée à des différences régionales ou hémisphériques dans la source de Cl^- atmosphérique et/ou au mécanisme impliqué dans la production de ClO_4^-. La gamme des valeurs de $\Delta^{17}O$ dans le ClO_4^- naturel pourrait s'expliquer par les différences régionales dans le climat et le mode de formation du ClO_4^-, ainsi que par un échange lent d'isotopes d'oxygène ou une dégradation abiotique, car les valeurs pour les hautes plaines du sud proviennent principalement d'échantillons d'eau souterraine et ceux de la Vallée de la Mort (*Death Valley*) proviennent de zones non saturées (Sturchio et al., 2011). Les échantillons des eaux des Grands Lacs ont des compositions isotopiques ClO_4^- similaires à celles des eaux souterraines du sud-ouest des États-Unis, ce qui pourrait indiquer qu'il s'agit d'une composition isotopique typique de ClO_4^- naturel indigène à travers le milieu du continent nord-américain.

Malgré ces incertitudes, la *Forensie* environnementale[279] exploite cette approche isotopique pour tracer les sources de pollution en ClO_4^- et chercher à définir les sources qui impactent les eaux souterraines, dans le but de rechercher, notamment, les responsabilités.

---

[274] Jackson, W. A.; Anandam, S.-K.; Anderson, T.; Lehman, T.; Rainwater, K.; Rajagopalan, S.; Ridley, M. K.; Tock, R. (2005). *Perchlorate occurrence in the Texas southern high plains aquifer system. Ground Water Monitor. Remed.* 2005b, 25, 137-149.

[275] Plummer, L. N.; Böhlke, J. K.; Doughten, M. W. (2006). *Perchlorate in Pleistocene and Holocene groundwater in north-central New Mexico. Environ. Sci. Technol*. 2006, 40, 1757 - 1763.

[276] Rajagopalan, S.; Anderson, T.A.; Fahlquist, L.; Rainwater, K.A.; Ridley, M.; Jackson, W.A. (2006). *Widespread presence of naturally occurring perchlorate in high plains of Texas 803 and New Mexico. Environ. Sci. Technol*. 40:3156 – 3162.

[277] Rao B, Anderson TA, Orris G, Rainwater KA, Rajagopalan S, Sandvig RM, Scanlon BR, Stonestrom DA, Walvoord MA, Jackson WA (2007). *Widespread natural perchlorate in unsaturated zones of the Southwest United States. Environ Sci Technol* 41:4522 – 4528.

[278] Sturchio, N.C., Hoaglund III, J.R., Marroquin, R.J., Beloso Jr., A.D., Heraty, L.J., Bortz, S.E., Patterson, T.L., (2012). *Isotopic mapping of perchlorate plumes. Ground Water* 50, 94–102.

[279] Terme générique désignant l'ensemble des recherches et outils permettant de déterminer l'origine et/ou la datation des pollutions environnementales.

Ainsi, cette approche a été mise à profit pour discriminer au sein de panaches mixtes de ClO_4^- quelles étaient les différentes contributions à cette pollution des eaux souterraines (Böhlke et al., 2005[280], 2009[281]; Jackson et al., 2010[282]; Poghosyan et al., 2014[283]; Sturchio et al., 2011, 2012[284], 2014[285]).

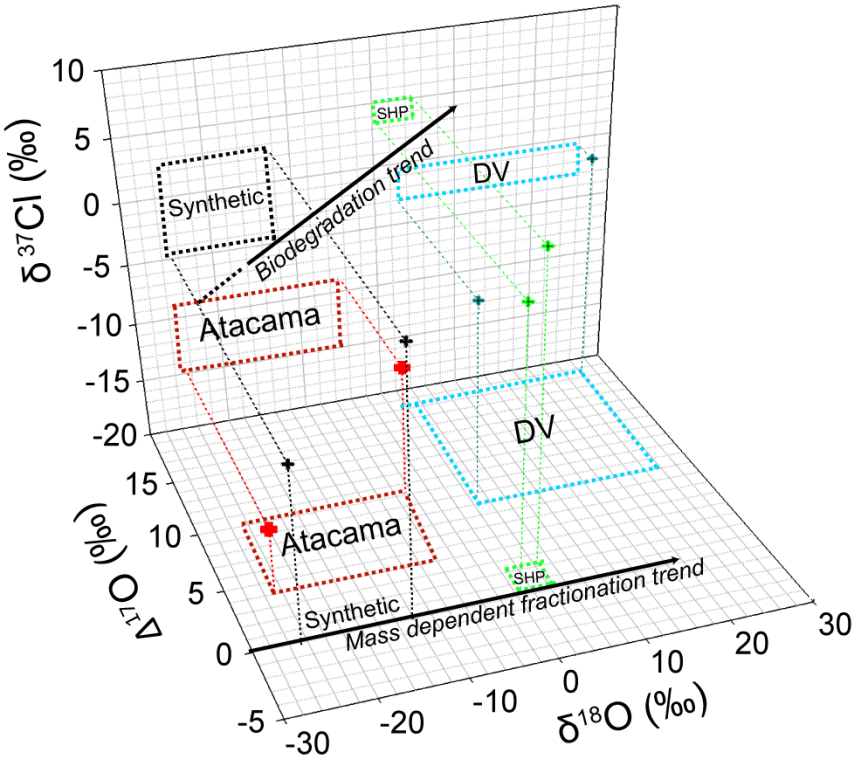


Figure 59 : Signature isotopique ($\delta^{37}Cl$, $\Delta^{17}O$ et $\delta^{18}O$) de ClO_4^- dans des échantillons synthétiques, du désert d'Atacama, de Death Valley (Californie) (DV) et des hautes plaines du Sud (Southern High Plain, Texas) (SHP) à partir de données publiées dans des revues à comité de lecture. La flèche dans le graphique $\delta^{37}Cl$ vs $\delta^{18}O$ représente la direction de la biodégradation ($\delta^{37}Cl = 0,4\ \delta^{18}O$) et la flèche dans le graphique $\Delta^{17}O$ vs $\delta^{18}O$ représente la direction du fractionnement dépendant de la masse. Les cases en pointillés représentent la plage maximale de signature isotopique des différentes sources, établie à travers toutes les données publiées (Ader et al., 2001 ; Bao and Gu, 2004 ; Böhlke et al., 2005, 2009 ; Jackson et al., 2005, 2010 ; Parker et al., 2008[286] ; Plummer et al., 2006 ; Rajagopalan et al., 2006 ; Rao et al., 2007 ; Sturchio et al., 2007, 2011).

---

[280] Böhlke, et al., (2005), *op. cit*.

[281] Böhlke, J. K.; Hatzinger, P. B.; Sturchio, N. C.; Abbene, I. J.; Mroczkowski, S. J. (2009). *Atacama perchlorate as an agricultural contaminant in groundwater: Isotopic and chronologic evidence from Long Island, New York. Environ. Sci. Technol*. 2009, 43, 5619–5624.

[282] Jackson et al., (2010), *op. cit*.

[283] Poghosyan, A., Sturchio, N.C., Morrison, C.G., Beloso, A.D. Jr., Guan, Y., Eiler, J.M., Jackson, W.A. and Hatzinger P.B. (2014). *Perchlorate in The Great Lakes: Isotopic Composition and Origin. Environ. Sci. Technol*. 2014, 48, 11146 – 11153.

[284] Sturchio, et al., (2012), *op. cit*.

[285] Sturchio, N.C., Beloso A. Jr., Heraty, L.J., Wheatcraft, S., Schumer, R. (2014). *Isotopic Tracing of Perchlorate Sources in Groundwater from Pomona, California. Applied Geochemistry* (2014). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.01.012.

[286] Parker, D.R. (2009). *Perchlorates in the environment – the key current issues. Environ. Chem.* 2009, 6, 1–2. doi:10.1071/EN09016.

De nombreuses études ont démontré que le ClO_4^- peut être métabolisé par des bactéries réductrices de perchlorate (PCRB) (Ader et al., 2008[287]; Attaway et Smith, 1993[288]; Coates et al., 1999[289]; Coates et Achenbach, 2004[290]; Hatzinger et al., 2009[291]; Stroo et al., 2008[292]; Wallace et al., 1996[293]; Xu et al., 2015[294]). A l'instar des nitrates, oxyanion de l'azote NO_3^-, les microorganismes présents dans le milieu souterrain possèdent cette faculté, en absence d'oxygène et donc de respiration oxique, de tirer leur énergie métabolique en respirant les ions perchlorate ClO_4^- et chlorate ClO_3^-, ces oxyanions se substituant à l'oxygène et en absence de tout autre accepteur d'électron (comme les nitrates NO_3^-, le Fe^{3+}, les sulfates SO_4^{2-}).

Les études ont montré que la réduction de $^{35}Cl_{ClO4}$ et $^{16}O_{ClO4}$ était plus rapide que celle de $^{37}Cl_{ClO4}$ et $^{18}O_{ClO4}$, entrainant un fractionnement isotopique. Ce fractionnement n'est pas dépendant de la concentration en ClO_4^- dans le milieu, ni du taux de réduction de ClO_4^-. La relation entre la concentration en chlore et le rapport isotopique Cl suit un modèle de distillation de Rayleigh (Ader et al., 2008). La connaissance des effets isotopiques de la biodégradation de ClO_4^- est d'une importance primordiale dans les études sur l'origine et le comportement de ClO_4^- dans l'environnement, car elle peut fournir un test sur l'hypothèse d'une réduction microbienne du ClO_4^- ainsi que de fournir une contrainte sur la composition isotopique initiale de ClO_4^- partiellement biodégradé (Jackson et al., 2010[295]; Poghosyan et al., 2014[296]; Sturchio et al., 2014[297]). D'autres recherches originales en milieu industriel démontrent que les ions perchlorate peuvent être respirés pour dégrader des solvants chlorés en conditions anaérobies (Harris, 2016, non publié).

Ainsi le fractionnement isotopique sur $\delta^{18}O$ à $\delta^{17}O = 0$ signe l'origine des ions perchlorate synthétiques, alors qu'un fractionnement sur les isotopes du chlore ^{37}Cl est un indicateur de l'évolution de ces ions sous l'effet de mécanismes de biodégradation.

---

[287] Ader, M., Chaudhuri, S., Coates, J. D., & Coleman, M. (2008). *Microbial perchlorate reduction: A precise laboratory determination of the chlorine isotope fractionation and its possible biochemical basis. Earth and Planetary Science Letters,* 269(3-4). 605-613.

[288] Attaway, H., & Smith, M. (1993). *Reduction of perchlorate by an anaerobic enrichment culture. Journal of Industrial Microbiology*, 12, 408-412.

[289] Coates, J.D., Michaelidou, U., Bruce, R.A., O'Connor, S.M., Crespi, J.N., and Achenbach L.A. (1999). *Ubiquity and Diversity of Dissimilatory (Per)chlorate-Reducing Bacteria. Appl. Environ. Microbiol*. 1999, 65(12):5234.

[290] Coates, J. D., & Achenbach, L. A. (2004). *Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism. Nature Reviews Microbiology*, 2(7). 569-580.

[291] Hatzinger, P. B., Böhlke, J. K., Sturchio, N. C., Gu, B., Heraty, L. J., & Borden, R. C. (2009). *Fractionation of stable isotopes in perchlorate and nitrate during in situ biodegradation in a sandy aquifer. Environmental Chemistry*, 6(1). 44-52.

[292] Stroo, H. F., & Ward, C. H. (Eds.). (2008). *In situ bioremediation of perchlorate in groundwater*. Springer Science & Business Media.

[293] Wallace, W., Ward, T., Breen, A., & Attaway, H. (1996). *Identification of an anaerobic bacterium which reduces perchlorate and chlorate as Wolinella succinogenes. Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 16(1). 68-72.

[294] Xu, X., Gao, B., Jin, B., Zhen, H., Wang, X., Dai, M. (2015). *Study of microbial perchlorate reduction: Considering of multiple pH, electron acceptors and donors. Journal of Hazardous Materials* 285 (2015) 228–235.

[295] Jackson et al., (2010), *op. cit.*

[296] Poghosyan, et al.,(2014), *op. cit*.

[297] Sturchio, et al.,(2014), *op. cit*.

- **Objectifs des mesures isotopiques**

Suite à la détection inattendue d'ions perchlorate dans les poudres et explosifs collectés sur le terrain, la question s'est posée d'où pouvaient provenir ces ions. Il n'est fait en effet, (à l'exclusion de la Poudre noire), aucune mention dans les documents d'archive consultés dans le cadre de cette recherche d'occurrences de sels de (per)chlorate dans les poudres propulsives et les explosifs standards produits et utilisés durant la Grande Guerre. Les recherches historiques pointèrent trois origines possibles.

Les mesures isotopiques de O, Cl au sein des molécules de perchlorate détectées dans les échantillons de poudres et d'explosifs collectés ont deux finalités (i) identifier la signature isotopique des perchlorates liés aux explosifs de 1914-1918 et s'il existe une signature bien spécifique à ces perchlorates (ii) préciser l'origine des ions perchlorate dans les poudres et explosifs non explicitement perchloratés.

- **Protocoles d'extraction et d'analyse**

Les analyses isotopiques visant les ions perchlorate sont généralement réalisées sur des échantillons constitués à partir des eaux souterraines ou superficielles. Les ions perchlorate de ces eaux sont piégés et enrichis dans une colonne renfermant une résine poreuse échangeuse d'ion selective (*Amberlite*) dans laquelle l'eau transite. L'extraction et la purification de ClO_4^- ont été réalisées par le *Department of Civil and Environmental Engineering of Texas Tech University* (USA) dont les principales étapes clés sont résumées dans ce qui suit (i) la résine est lavée à l'eau déminéralisée et balayée par un flux d'HCl quadrimolaire afin de retirer NO_3^-, SO_4^{2-}, HCO_3^- et les composés organiques (ii) les ClO_4^- absorbés sont lixiviés de la résine au moyen d'une solution molaire $FeCl_3$ et de 4M HCl (Gu et al., 2007[298], 2001[299]; Gu and Brown, 2006[300]) (iii) les ClO_4^- lixiviés sont ensuite purifiés par une série de précipitations, d'extraction liquide - liquide, évaporation, processus d'échange cationique et de cristallisation de sels de ClO_4^- pour l'analyse isotopique. Les échantillons solides ont été lixiviés puis la phase de purification opérée sur l'éluat ainsi généré selon le protocole décrit ci-avant.

Les abondances relatives des isotopes stables du chlore (^{37}Cl et ^{35}Cl) et de l'oxygène (^{18}O, ^{17}O et ^{16}O) dans ClO_4^- ont été analyses par un spectromètre de masse isotopique (*Isotope-Ratio Mass Spectrometry*, IRMS) au *Environmental Isotope Geochemistry Laboratory* de l'université du Delaware (USA).

[298] Gu, B., Brown, G.M., Chiang, C.-C. (2007). *Treatment of Perchlorate-Contaminated Groundwater Using Highly Selective, Regenerable Ion-Exchange Technologies. Environ. Sci. Technol*. 41, 6277–6282. https://doi.org/10.1021/es0706910.

[299] Gu, B., Brown, G.M., Maya, L., Lance, M.J., Moyer, B.A. (2001). *Regeneration of Perchlorate (ClO_4^-) Loaded Anion Exchange Resins by a Novel Tetrachloroferrate ($FeCl_4^-$) Displacement Technique. Environ. Sci. Technol*. 35, 3363–3368. https://doi.org/10.1021/es010604i.

[300] Gu, B., Brown, G.M. (2006). "Recent Advances in Ion Exchange for Perchlorate Treatment, Recovery and Destruction" In Gu, B., Coates, J.D. (Eds.). *Perchlorate: Environmental Occurrence, Interactions and Treatment*. Springer US, Boston, MA, pp. 209–251. https://doi.org/10.1007/0-387-31113-0_10.

- **Analyses isotopiques réalisées**

Les analyses isotopiques furent entreprises sur un nombre restreint d'échantillon. Le nombre et le choix des échantillons furent doublement contraints (i) par les quantités de perchlorate disponibles dans les échantillons (dépendant de la masse des échantillons et de la teneur en perchlorate, afin de satisfaire à l'obtention d'une masse critique de 10 mg ClO_4^-), (ii) les coûts élevés des analyses et des préparations requises pour ces analyses (> 4 000 US$). Ainsi, parmi les explosifs non explicitement perchlorates, seul l'explosif de grenade à manche HG3 a pu être analysé. Le nombre d'échantillons susceptible de satisfaire aux exigences de ces critères était très restreint dans le cadre de cette recherche, rendant cette approche aucunement représentative mais exploratoire. L'analyse isotopique a pu être réalisées sur les échantillons suivants :

- 58T, explosif perchlorate français ayant chargé une bombe empennée à ailette d'artillerie de tranchée type « Crapouillot » ;

- *Perdite 1 et Perdite 2*, deux échantillons de blocs de 1 kg de *Perdite* allemande échantillonnés au sein d'une charge de destruction abandonnée dans une galerie allemande à la Haute-Chevauchée, Argonne ;

- HG3 explosif ayant chargé une grenade à manche allemande, échantillonné en Argonne ;

Analyses isotopiques de N et O dans NO_3^- des poudres et explosifs échantillonnés

- **Principe et objectifs**

L'oxydation de la matière organique des sols produit de l'ammonium (NH_4^+) qui par nitrification donne des nitrites (NO_2^-) très instables puis des nitrates NO_3^-. Les nitrates issus de la minéralisation de la matière organique ont des valeurs isotopiques contrôlées par la composition isotopique de l'azote minéralisable et des fractionnements isotopiques lors des processus de transformation. À l'inverse, la réduction des nitrates donne des nitrites, NO, N_2O puis N_2 gazeux. Le $\delta^{15}N$ et le $\delta^{18}O$ des nitrates (NO_3^-) sont utilisés ensemble pour la détermination de l'origine des composés azotés (Heaton (1986)[301] ; Kendall et McDonnel, (1998)[302]). Les diverses sources d'apport en azote (déjections animales, engrais chimiques, eaux usées principalement) possèdent des signatures isotopiques différentes. Ces isotopes permettent également de mettre en évidence des processus de dénitrification (cf. Figure 60). Les nitrates produits ainsi dans les sols ont des $\delta^{15}N$ compris entre 6 et 9‰. Le $\delta^{15}N$ des engrais synthétisés à partir de l'azote de l'air varie entre – 4 et + 4‰. Les déchets organiques d'origine humaine ou animale présentent une fermentation ammoniacale et les fractionnements induits amènent des valeurs de $\delta^{15}N$ supérieures à 9‰.

L'utilisation de $\delta^{15}N$ permet de lever certaines incertitudes sur l'origine des polluants (Widory et al., 2004[303]). En effet, pour le $\delta^{15}N$ (et $\delta^{18}O$) des NO_3^-, la signature isotopique est identique pour les eaux usées et les engrais organiques.

---

[301] Heaton, T.H.E (1986). *Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. Chemical Geology*, 59, 87-102.

[302] Kendall C., McDonnel J.J. (1998). *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 839 p.

[303] Widory D., Kloppmann W., Chery L., Bonnin J., Rochdi H. (2004). *Nitrates in groundwater: an isotopic multi-tracer approach. Journal of Contaminant Hydrology,* Vol. 72, pp. 165-188.

L'objectif des analyses isotopiques de O et N des nitrates est d'identifier l'origine des nitrates présents dans les explosifs et de mettre en évidence d'éventuel processus réactionnels ayant pu contribuer à faire évoluer la composition en nitrate et ammonium des matières énergétiques placées dans des conditions environnementales naturelles. La mesure des abondances isotopiques de l'azote et de l'oxygène des NO_3^- complètent celle du chlore et de l'oxygène de ClO_4^-, car les nitrates et les ions perchlorate naturels du Chili possèdent tout deux des signatures isotopiques spécifiques et caractéristiques. Le couplage de ces mesures permet donc de valider ou d'invalider l'hypothèse de la présence dans les explosifs d'ions nitrate et d'ions perchloraté liés, provenant tous deux de nitrates du Chili.

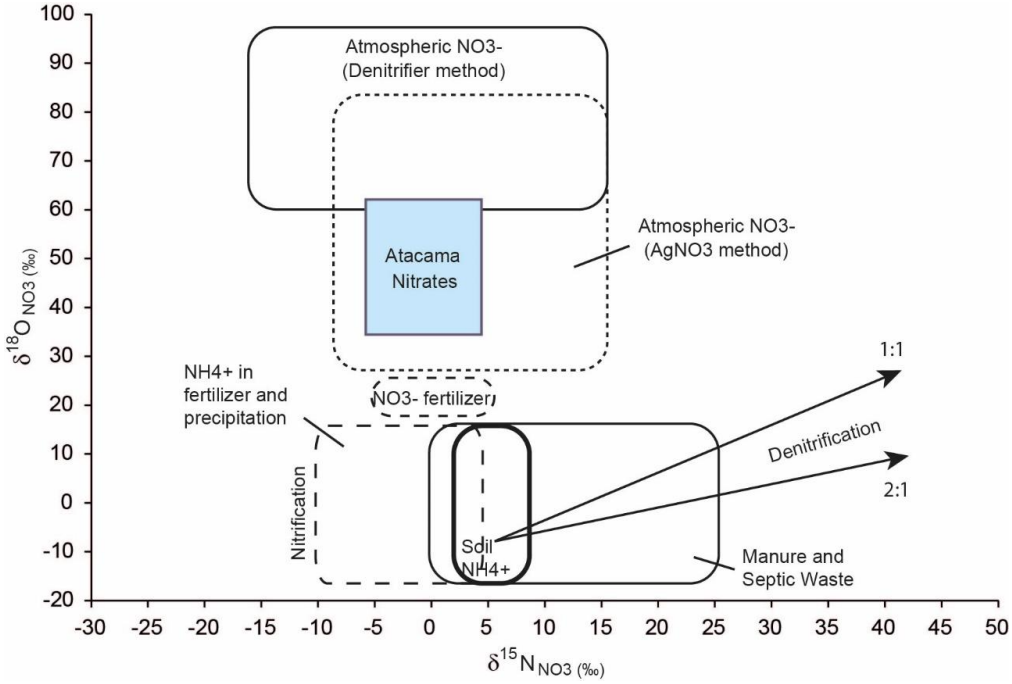


Figure 60 : Signatures isotopiques $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 des différentes origines des nitrates naturels et synthétiques (NO3-Fertilizer).

- **Protocoles d'extraction et d'analyse**

Les échantillons solides de poudres et explosifs ont été soumis à une lixiviation de 24 heures sous agitation dans de l'eau déminéralisée, à l'abri de la lumière. Les lixiviats ont été filtrés à 0,45 µm et reconditionnés dans des flacons en polyéthylène de 50 mL. Les ratios isotopiques de l'oxygène et de l'azote des nitrates ont été mesurés selon la méthode de dénitrification décrite dans Morin et al., (2009)[304] et Savarino et al., (2013)[305]. Cette méthode se base sur la conversion de NO_3^- en N_2O, par les bactéries du genre *Pseudomonas aureofaciens*, dont la composition isotopique est ensuite déterminée par analyse après décomposition thermique en O_2 et N_2. L'analyse isotopique a été réalisée au moyen d'un spectromètre de masse pour isotopes stables Thermo Finnigan MAT253 doté d'une *interface gas-bench* au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement de l'université Joseph Fourier de Grenoble (Isère, France).

[304] Morin, S., Savarino, J., Frey, M.M., Domine, F., Jacobi, H.-W., Kaleschke, L., Martins, J.M.F. (2009). *Comprehensive isotopic composition of atmospheric nitrate in the Atlantic Ocean boundary layer from 65°S to 79°N. J. Geophys. Res. Atmospheres* 114. https://doi.org/10.1029/2008JD010696

[305] Savarino, J., Morin, S., Erbland, J., Grannec, F., Patey, M.D., Vicars, W., Alexander, B., Achterberg, E.P. (2013). *Isotopic composition of atmospheric nitrate in a tropical marine boundary layer*. Proc. Natl. Acad. Sci. 110, 17668–17673. https://doi.org/10.1073/pnas.1216639110

- **Analyses isotopiques réalisées**

Ont été analysés :

- Les poudres (paillettes) nitrocellulosiques des cartouches d'armes à feu portatives allemande Mauser (série M1 à M12), soit 12 échantillons,
- Les explosifs de grenades à manche allemandes provenant de l'Argonne et Vauquois (série GAM et COR GAM), soit 14 échantillons,
- Neuf échantillons d'explosifs nitrés de projectiles d'artillerie,
- Quatre échantillons d'explosifs de sureté allemands (*Donarite, Westfalite*),
- Un échantillon de *Dynamite-gomme* française,
- Un échantillon d'explosif perchloraté d'un projectile d'artillerie de tranchée français « Crapouillot » 58T et un échantillon d'explosif nitré nitraté d'un projectile d'artillerie de tranchée allemand Maganer (MAG).
- Un échantillon de résidus d'une charge d'autodestruction chloratée française provenant de Vauquois (Four S').

Au total 43 échantillons de poudres et explosifs ont été analysés pour le dosage des ratios isotopiques de O et N des NO_3^-.

Résultats

- **Isotopes stables de O, Cl dans ClO_4^-**

Les résultats des analyses isotopiques sont rassemblés dans le tableau placé en Annexe B du présent manuscrit.

Les analyses isotopiques montrent, comme escompté, des signatures $\delta^{18}O$ / $\delta^{17}O$ caractéristiques de perchlorates synthétiques ($\delta^{17}O \sim 0$), pour les échantillons 58T, *Perdite 1* et *Perdite 2*, s'agissant d'explosifs explicitement perchloratés, produit par l'électrolyse de saumures NaCl. L'échantillon HG3, issu d'une grenade à manche allemande, visiblement chargée d'explosifs nitrés, montre pour les ions perchlorates, qu'ils portent une signature similaire. Les signatures isotopiques caractéristiques des ions perchlorate synthétiques diffèrent d'un point à l'autre avec la variation de $\delta^{18}O$. Aucun fractionnement significatif sur $\delta^{37}Cl$ n'a été mesuré attestant de l'absence de processus de biodégradation des ions perchlorate dans les échantillons d'explosifs collectés.

Les perchlorates présents dans HG3 ne sont donc pas issus d'impuretés des acides nitriques dérivés des nitrates du Chili. Il s'agit d'un perchlorate de synthèse. Il n'existe aucune indication dans les archives consultées de l'occurrence de sels perchloratés dans les explosifs nitrés chargeant les grenades à manche allemandes, ni de la présence de ces sels dans les amorces des détonateurs fusants de ces grenades, qui en se dégradant auraient pu « polluer » le chargement explosif. Les archives ne fournissent aucune explication relative à ces compositions.

- **Isotopes stables de O, N dans NO_3^-**

Les résultats des analyses isotopiques sont rassemblés dans le tableau placé en Annexe B. Les couples de valeurs $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 sont présentés dans le graphique de la Figure 61.

On constate que l'essentiel des valeurs $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ est regroupé dans le domaine des signatures isotopiques connues dans les sols et les eaux anthropisées par l'apport d'engrais organiques et inorganiques et d'eaux usées, d'apports atmosphériques. Les signatures isotopiques n'apportent aucun indice d'une influence sur la chimie de l'azote des explosifs des nitrates du Chili.

La signature en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ dans les explosifs qui ont été analysés pour la première fois selon ces protocoles, recouvre des valeurs très contrastées comparativement au $\delta^{18}O\text{-}NO_3$, s'étendant du pôle de la dénitrification (avec enrichissement en ^{15}N) à des valeurs signant un extrême appauvrissement, avec des valeurs en ^{15}N très négatives rarement publiées au regard de la littérature scientifique consultée (en vert dans la Figure 62 et la Figure 63). Les valeurs les plus négatives concernent un explosif de grenades à manche allemandes (GAM3), une *Westfalite*, la *Dynamite-gomme* française. D'autres points se distinguent par une tendance à l'enrichissement en ^{18}O, les rapprochant des signatures connues pour les engrais de synthèse (en rouge dans la Figure 61 et la Figure 62), c'est-à-dire les nitrates synthétiques, essentiellement produits par des procédés proches ou équivalent à celui d'Haber-Bosch. Ces échantillons sont aussi ceux montrant un enrichissement en ^{17}O (cf. Figure 62).

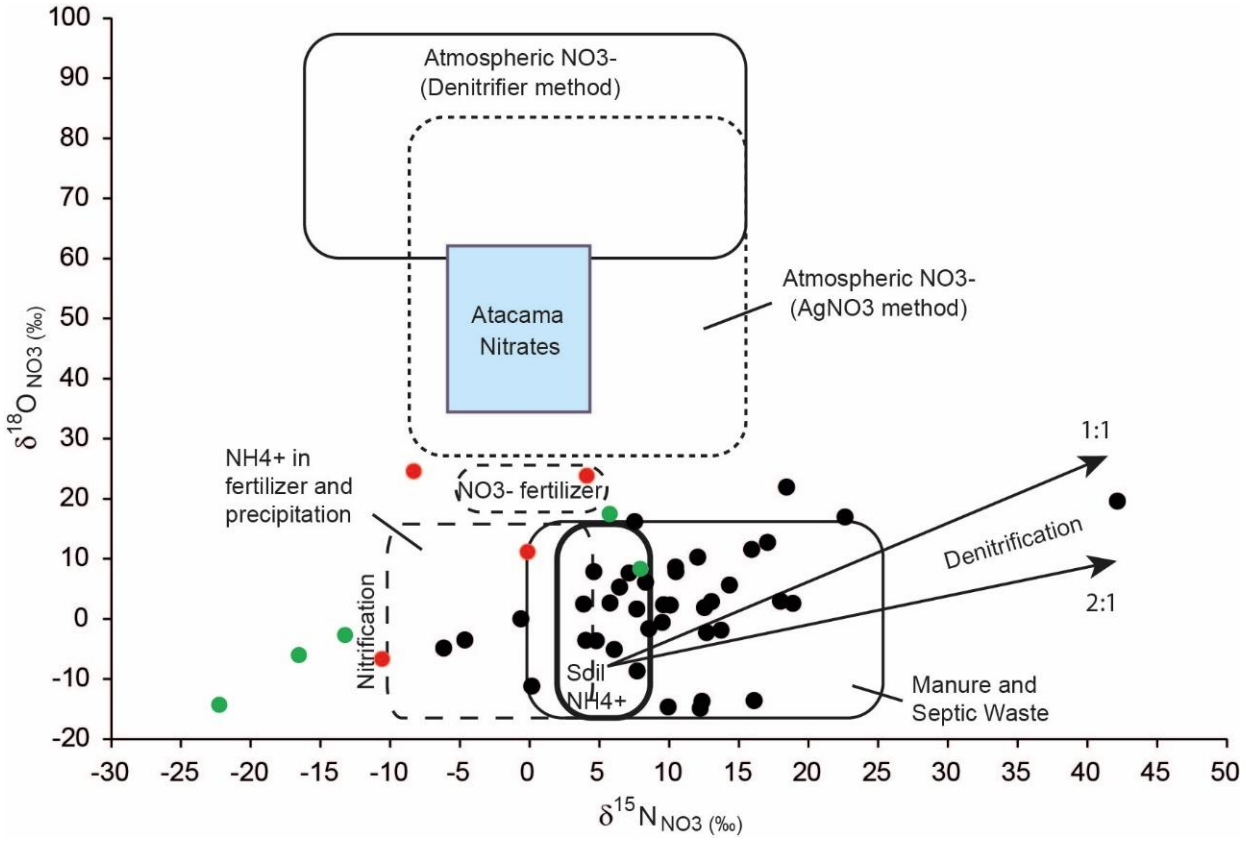


Figure 61 : Résultats $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ des poudres et explosifs analysés.

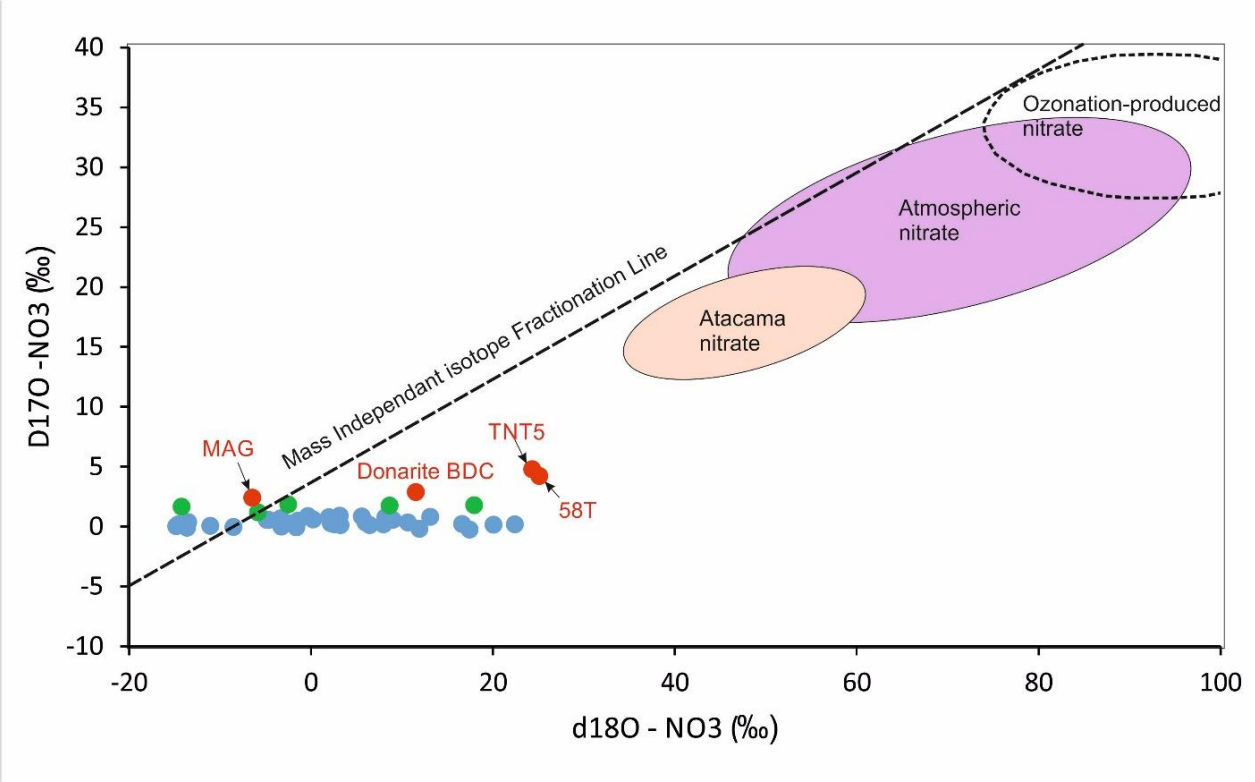


Figure 62 : Résultats $D^{17}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ des poudres et explosifs analysés.

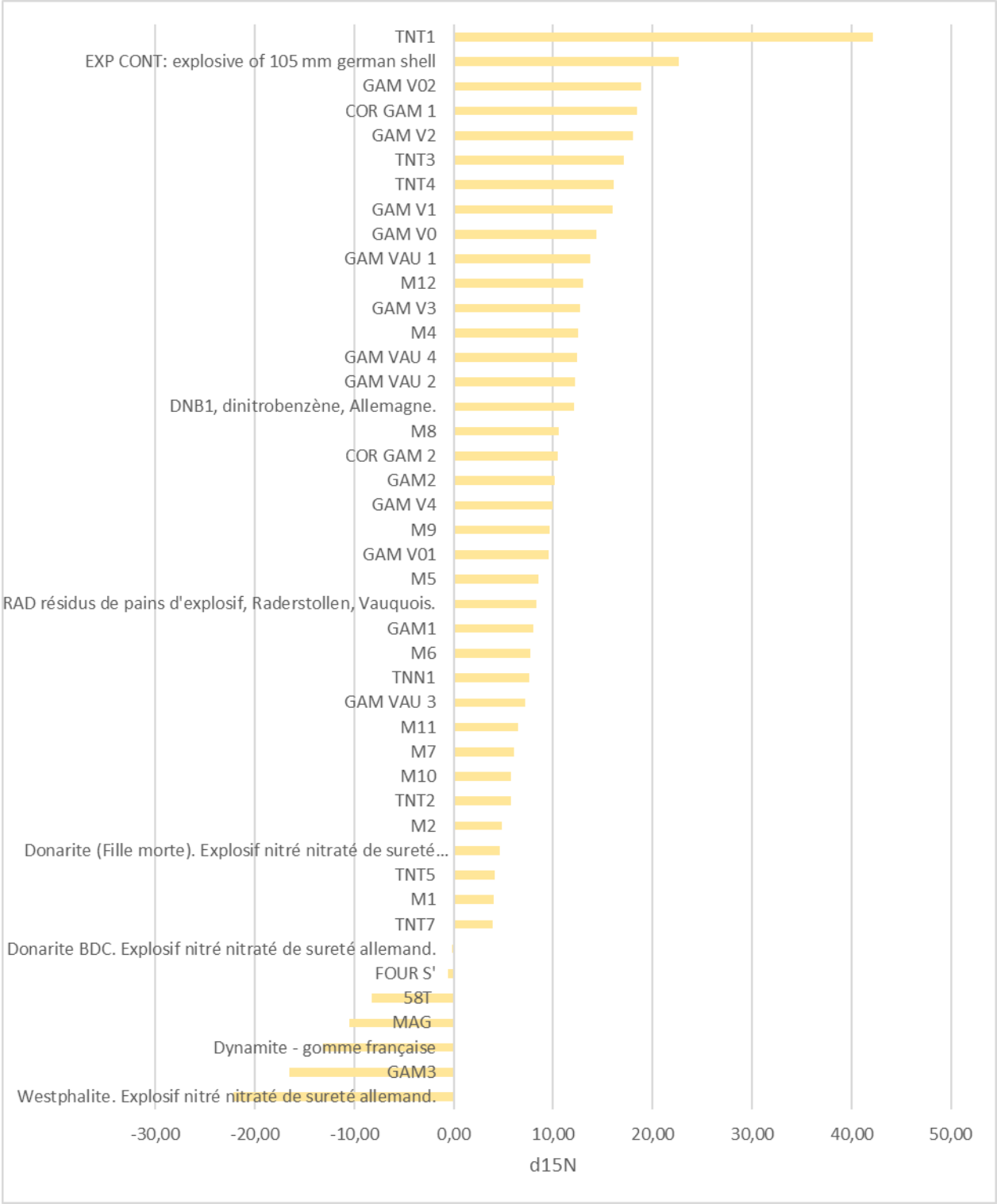


Figure 63 : Signatures en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ par échantillon.

Conclusion

L'occurrence dans les échantillons d'explosifs collectés et analysés à la faveur de cette recherche de nitrates possédant une signature isotopique sur $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ et un $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ caractéristiques des nitrates naturels du Chili n'a pas été mise en évidence. Il n'existe donc aucun indice par les mesures isotopiques de O, N des nitrates de la présence de nitrates chiliens dans les poudres et explosifs analysés. Les analyses isotopiques sur l'azote et l'oxygène des nitrates tendent à montrer l'existence de signatures fortement contrastées. L'essentiel des couples $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ s'inscrivent dans le domaine des sols avec des signatures s'orientant vers trois pôles différents (i) vers les nitrates de synthèse, comme ceux produits par le procédé Haber-Bosch, (ii) vers la dénitrification par un enrichissement en $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ <u>et</u> $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ et (iii) à l'opposé vers un appauvrissement notable en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ comme observé durant la nitrification. Le point GAM3 fait partie des échantillons montrant une signature $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ très appauvrie (vers -16 ‰), et ne présente pas une signature $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ de type Atacama. Cet échantillon est riche en perchlorate qui montrent une signature isotopique O, Cl des ions perchlorate synthétique.

Le ou les processus à l'origine de cet appauvrissement en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ restent hypothétiques. Aucune référence à ce type de fractionnement n'a été identifiée dans la littérature scientifique publiée. Le procédé Oswald d'oxydation catalytique de l'ammoniac (NH_3) en acide nitrique (HNO_3), ainsi que le procédé de fixation de l'azote atmosphérique par l'arc électrique (procédé Birkeland-Eyde) sont les seuls processus physico-chimiques identifiés parmi ceux conduisant à la genèse des nitrates durant lesquels la production de nitrates pourrait être à l'origine d'un fractionnement privilégiant les isotopes légers de l'azote.

3.3.6 Conclusion et discussion

Les analyses isotopiques originales sur O, Cl des ions perchlorate (ClO_4^-) et O, N des ions nitrate (NO_3^-) sur un jeu d'échantillons d'explosifs de la fin de la Grande Guerre n'ont pas permis de mettre en évidence leur origine chilienne naturelle. Les analyses tendent à prouver que les ions perchlorate et certains ions nitrate seraient synthétiques. L'origine de l'appauvrissement en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ sur certains points de mesure reste hypothétique et peut être à rechercher dans les procédés industriels de production des nitrates synthétiques. L'hypothèse la plus plausible concernant l'occurrence inattendue d'ions perchlorate dans les explosifs allemands de piètre qualité, typique de la fin de la guerre, comme ceux chargeant les grenades à manche, est celle d'un ajout volontaire et intentionné de sels de perchlorate de synthèse pour accroître la brisance de la détonation de ces engins. Les sels perchlorates ont en effet été produits par l'industrie des poudres et explosifs en Allemagne à la fin de la guerre comme explosif de secours pour pallier aux pénuries en explosifs nitrés nitratés. Le nombre trop restreint d'analyses isotopiques O, Cl sur les ions perchlorate et O, N sur les ions nitrate ne permet pas d'étendre ces conclusions aux autres explosifs montrant la présence de perchlorate. Une signature isotopique N, O de type Atacama ne peut être exclue, dans certains explosifs nitrés et/ou nitratés, en particulier ceux du début de la Grande Guerre (lorsque les nitrates du Chili étaient encore source d'azote pour l'industrie des poudres et explosifs allemande, avant le recours aux nitrates de synthèse issus du procédé sous pression Haber-Bosch). Enfin, d'autres signatures isotopiques peuvent être pressenties par l'usage du procédé de fixation de l'azote atmosphérique à l'arc électrique (procédé Birkeland Eyde), au cours duquel des conditions proches de celles concourant à la formation des nitrates et perchlorates dans la haute atmosphère sont réunies. Une signature de nitrates et/ou perchlorates synthétiques proches des signatures naturelles ne peut être exclue.

4. Résumé et conclusions de la Section 1h. Le kaléidoscope chimique de la Grande Guerre

« Durant tout le cours de la guerre, les belligérants ont mis particulièrement deux sciences en réquisition : l'histoire et la chimie. Celle-ci a fourni des explosifs et des gaz ; celle-là des prétextes, des justifications ou des excuses[306] ».

Les poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale étaient des composés énergétiques métastables constitués d'une ou plusieurs substances nitrées ou nitratées, éventuellement associées à des adjuvants. La chimie de ces composés était basée sur celle de l'azote à l'exception des ions chlorate ClO_3^- et perchlorate ClO_4^-. Ils constituaient le chargement des munitions conventionnelles et les ergols solides de propulsion des projectiles en service dès 1914.

A l'automne 1914, avec l'amenuisement non anticipé des stocks de poudres et d'explosifs réglementaires du temps de paix puis avec la rupture des relations commerciales entre les parties belligérantes, les filières industrielles des poudres et explosifs furent contraintes aux productions du temps de guerre. La composition des munitions et de leurs chargements, les quantités produites ne cessèrent d'évoluer durant le conflit en lien avec l'évolution (i) de l'accessibilité aux ressources minérales et énergétiques nécessaires à leur production, (ii) des capacités et savoir-faire industriels et enfin (iii) des besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne.

Parmi ces belligérants, c'est indéniablement l'Allemagne qui eut à subir les changements les plus significatifs dans la composition de ses matières énergétiques, agressives et de ses projectiles du fait d'une accessibilité limitée à certaines ressources, imposée par l'efficacité du blocus maritime britannique et la pauvreté du sous-sol allemand en métaux non-ferreux. Des évolutions furent aussi impulsées par des innovations dans le domaine de la chimie de l'azote et des toxiques de guerre. En France, les formulations des explosifs (per)chlorates qui chargèrent grenades et projectiles d'artillerie de tranchée furent modifiées durant la guerre en réponse à des contraintes de coûts, de productivité et d'accès aux ressources en potassium.

Globalement, toutes les parties belligérantes utilisèrent durant la Première Guerre mondiale les mêmes composés chimiques pour constituer leurs explosifs et propulseurs mais dans des proportions différentes (i) le TNT souvent associé au nitrate d'ammonium (formulation d'*Amatol*) prévalait dans les artilleries allemandes et britanniques, pays riches en charbon et donc en hydrocarbures, (ii) les Français privilégièrent quant à eux les explosifs à base de *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol), synthétisée à partir d'hydrocarbures importés de Bornéo. Enfin, les amorces des fusées et cartouches étaient majoritairement confectionnées à base de fulminate de mercure (ou di-fulminate de mercure) et les gaines-détonateurs à base de chlorate et/ou de *Mélinite*.

Mais des spécificités dans la composition des chargements propres à certains protagonistes ont été identifiées dans cette recherche. L'usage massif et systématique des explosifs (per)chlorates constitua une spécificité de l'artillerie de tranchée française dès 1915 alors que le recours aux explosifs perchlorates fut très tardif et limité (explosif de secours) dans la guerre au sein de l'armée allemande qui n'usa pas pour constituer les chargements d'explosifs chlorates.

[306] Cité dans Boone, Key Meulen (2017,) p. 220. (Henri Pirenne. *Discours inaugural du Ve Congrès international de Sciences historiques à Gand*, 1923).

Les Britanniques ne les utilisèrent que très peu pour certains chargements de bombes de tranchées, préférant réserver leur énergie électrique pour la synthèse du chlore et des gaz de combat. Il n'existe par ailleurs aucune indication dans les archives d'un usage significatif dans les explosifs standards réglementaires français et alliés de DNT (dinitrotoluènes), DNB (dinitrobenzènes) et de trinitroanisole (2-methoxy-1,3,5-trinitrobenzène) et trinitronaphtalènes (TNN) utilisés par les Allemands.

Les Allemands furent aussi contraints et forcés de rechercher des solutions techniques pour limiter leur consommation d'explosifs de qualité, destinés à l'Artillerie, en chargeant notamment grenades et bombes de tranchées avec des explosifs de piètre qualité et déchets de production du TNT expliquant la très grande diversité des composés constatée par les analyses au laboratoire sur un lot d'échantillons d'explosifs datant de la fin de la guerre. Les *screenings* de recherche systématique des liaisons organiques effectués sur ces échantillons dans le cadre de cette recherche montrent en effet la présence, sur bon nombre d'explosifs de grenades et bombes de tranchées allemandes, d'un très large spectre de NAC, formant des mélanges complexes atypiques dans lesquels s'associent des composés mono-, di-, et tri-nitrés.

A contrario, il semblerait que l'usage de la *Crésylite* (trinitrocrésol) ait été une particularité des compositions des explosifs de l'artillerie lourde française. L'usage de poudres propulsives (ergols solides) à base de nitrocellulose était commun à l'ensemble des parties, seuls les conditionnements et certains adjuvants différaient.

Quant aux explosifs utilisés pour constituer les fourneaux offensifs comme défensifs dans la guerre de mines (i) les Français usèrent majoritairement d'explosifs chloratés et de *Dynamite-gomme,* (ii) les Britanniques d'*Ammonal* (aluminium Al° + nitrate d'ammonium) et (iii) les Allemands d'une très grande diversité d'explosifs avec essentiellement des explosifs nitrés nitratés de sureté utilisés en temps de paix dans les mines et carrières.

Ces spécificités nationales valent aussi pour les chargements chimiques, l'Allemagne misant en 1917 sur l'usage massif au front d'agents agressifs vésicants (l'*Ypérite* fluidisée dans le chlorobenzène) et émétisants (arsines) qui n'avaient pas leurs pendants dans les artilleries chimiques alliées avant les derniers instants de la guerre.

Les analyses chimiques détaillées et originales, visant un large spectre de paramètres, réalisées sur un nombre significatif d'échantillons de poudres et explosifs collectés sur le terrain (72 échantillons), mettent en exergue, pour certains d'entre eux, des compositions conforme à celles renseignées dans les archives et documents de référence consultés dans le cadre de cette recherche. D'autres, par contre, ne sont pas évoqués dans la documentation. Il s'agit notamment de l'occurrence inattendue et systématique d'ions perchlorate à des teneurs variables et parfois élevées (> $gClO_4^-.kg^{-1}$), dans les explosifs, en particulier allemands et engins de tranchée de la fin de la guerre. Les analyses des isotopes stables de O, Cl dans ClO_4^- montrent que les explosifs analysés ne renferment que des ions perchlorate de synthèse, écartant pour le moment l'hypothèse de l'influence d'une pollution des explosifs par les perchlorates naturels issus des nitrates chiliens (via l'acide nitrique nécessaire à la production des explosifs nitrés / nitratés et les nitrates de conversion). Le faible nombre d'analyses isotopiques n'autorise aucune montée en généralité. Un ensemble d'archives apporte par contre la preuve historique de la pollution de la poudre noire (à base de salpêtre KNO_3) par les perchlorates initialement présents dans les $NaNO_3$ du Chili utilisés pour la fabrication du salpêtre.

Les abondances $\delta^{18}O\text{-}NO_3$ / $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ des nitrates présents dans un lot plus important d'échantillons analysés sont atypiques pour certains, marquées par des $\delta^{15}N\text{-}NO_3$ très appauvris (négatifs), alors que d'autres s'écartent du domaine des nitrates dont la signature isotopique a été tamponnée par les processus naturels de dénitrification dans les sols, pour s'approcher voire coïncider avec celle des nitrates des engrais de synthèse.

Pour expliquer la présence des ions perchlorate à des teneurs élevées dans des explosifs présentant (i) une composition organique proche de celle de déchets de production du TNT, (ii) une signature isotopique des nitrates très appauvrie en $\delta^{15}N\text{-}NO_3$, non Atacama, et, pour l'un d'entre eux, possédant une signature de perchlorate de synthèse, l'hypothèse d'un apport intentionnel de sels de perchlorate synthétique, pour possiblement doper la brisance des explosifs initialement de mauvaise qualité, peut être privilégiée.

Ces analyses montrent clairement que non seulement les explosifs explicitement (per)chloratés, mais aussi tout type de poudres propulsives (ergols solides) et d'explosifs nitrés et/ou nitratés de la fin de la Grande Guerre, peuvent potentiellement avoir été des pourvoyeurs d'ions perchlorate dans l'environnement.

Ces analyses chimiques et isotopiques sur un lot limité d'échantillons d'explosifs principalement allemands et de la fin de la guerre ne sont pas représentatives de la grande diversité des compositions des matières énergétiques de la Grande Guerre, mais mettent en exergue la possibilité d'écarts entre les formulations renseignées dans les archives et autres documents de référence et la réalité des chargements des engins utilisés durant la Grande Guerre. En ce sens, elles mettent en lumière l'intérêt d'une approche transdisciplinaire pour répondre aux questions de l'impact environnemental de la Grande Guerre.

L'étude des compositions des poudres et explosifs utilisées tout au long du conflit montre clairement leur évolution vers une diversification des produits chimiques produits et utilisés. La nature et la composition des engins de guerre utilisés et entreposés durant les derniers mois de la guerre sur le front occidental différaient donc de celles de 1914. L'augmentation significative de la part de munitions chimiques dans les dotations de l'Artillerie, la diversification des toxiques de guerre toujours plus agressifs et sournois, l'usage d'explosifs chargés d'impuretés et le recours à des alliages riches en éléments traces métalliques contribuèrent à la « toxification » des chargements et projectiles durant le premier conflit mondial.

Parallèlement à l'exploration historique et analytique des compositions chimiques et isotopiques (approche qualitative) des poudres et explosifs de la Grande Guerre, cette recherche propose aussi une estimation des ordres de grandeur des tonnages de substances énergétiques produits (approche quantitative) par les différents protagonistes engagés sur le front occidental. Des tonnages produits dépendent directement les tonnages utilisés au combat et donc la propension de chaque composé à avoir été introduits dans les sols au contact de l'environnement.

La grande hétérogénéité des données disponibles (regroupement des composés sous des catégories génériques « explosifs nitrés » « explosifs nitratés » « explosifs à base de TNT », selon des quantités produites, et/ou livrées aux armées et/ou utilisées), ne permet pas d'agréger les données quantitatives par composé pour l'ensemble des parties belligérantes engagées dans la Première Guerre mondiale à l'échelle du front occidental.

Les quantités de poudres, explosifs et toxiques de guerre produites et livrées aux armées durant les 52 mois de la guerre apparaissent toutefois considérables au regard des données historiques collectées.

Les principales parties belligérantes qui se battirent sur le front occidental entre 1914 et 1918 produisirent au total des quantités de matières énergétiques s'établissant aux environs de 3 400 000 tonnes[307]. Cette production était très largement dominée par les explosifs nitrés (majoritairement le TNT, la *Mélinite*) et nitratés (renfermant du nitrate d'ammonium) et la nitrocellulose pour les ergols solides. Environ 120 000 tonnes de toxiques de guerre et autres intermédiaires de synthèse (principalement du chlore liquide, phosgène, diphosgène, *Chloropicrine* et *Ypérite*) furent produites par les principales parties belligérantes engagées à partir de 1915, ce qui, se rapportant aux poudres et explosifs, ne représente que 4% de la production des produits chimiques destinés à des usages militaires durant la Grande Guerre. Ce pourcentage est troublant car il coïncide d'une part avec la proportion des munitions chimiques tirées (en moyenne sur 1915-1918) et les pertes occasionnées par cette arme renseignées dans les archives et la documentation spécialisée.

Les archives consultées n'ont pas permis de préciser les quantités d'explosifs perchloratés produits et/ou utilisés par les Allemands et les Britanniques durant la Grande Guerre. Les données quantitatives disponibles sont celles côté français, principaux producteurs et utilisateurs, et montrent que les explosifs (per)chloratés produits durant le conflit représentaient moins de 5% du tonnage total de poudres et explosifs.

Sur ces bases, une matrice croisant la nature des éléments formant les différentes munitions, leurs chargements et leur composition, établie sur la base des données collectées dans les archives peut être proposée (cf. Tableau 9). Cette liste de composés, déjà longue, ne saurait suffire à la caractérisation par l'analyse au laboratoire de l'impact des munitions, poudres et explosifs anciens sur notre environnement actuel. La grande majorité des composés affichés dans cette matrice issus des chargements des munitions anciennes est réactive une fois exposée aux conditions environnementales.

Cette réactivité génère des sous-produits de transformation environnementale, plus au moins persistants, qu'il convient d'identifier, pour compléter la liste des composés à analyser dans le cadre de recherches environnementales, et espérer être conclusif quant à la nature et à l'origine des éventuelles traces laissées par la Grande Guerre dans les sols et dans les eaux souterraines. Le chapitre qui suit dresse une synthèse du devenir spatial et temporel des principaux composés identifiés dans la recherche historique décrite ci-avant, au regard de l'état des connaissances actuelles et de la littérature scientifique publiée.

[307] On ne peut être catégorique sur le chiffre exact compte tenu des mouvements importation / exportation qu'il y a eu au sein des blocs de l'Entente (Alliés) et ceux de l'Alliance.

Section 2h
Devenir spatial et temporel des composés énergétiques dans l'environnement

1. Introduction générale de la Section 2h

Le comportement et le devenir spatial et temporel des composés énergétiques dans l'environnement sont, au même titre que les autres composés et substances polluantes rencontrées au droit de sites et sols pollués, contrôlés par les propriétés physico-chimiques intrinsèques propres à chacune des substances (comme la solubilité dans l'eau, la pression de vapeur, la constante de Henry, etc.), des facteurs environnementaux (conditions météorologiques, propriétés physico-chimiques des sols, des eaux, pH, redox, etc.) et enfin les conditions microbiologiques (typologie et populations bactériennes, etc.) régnant dans le milieu. Les processus influençant le devenir des composés énergétiques peuvent être divisés en trois grandes catégories (i) les processus favorisant la mobilisation vers l'environnement, et la mobilité, le transport (dissolution, volatilisation), (ii) les processus conservatifs freinant le transport (mécanismes de sorption au sens large, réversibles ou irréversibles (séquestration)), et (iii) les processus réactionnels biotiques (en conditions aérobie ou anaérobie) et abiotiques (hydrolyse, photolyse, etc.). Les processus abiotiques comme l'hydrolyse et la photolyse participent au comportement de ces composés dans les environnements de surface. La Figure 64 illustre le chaînage et les relations entre les mécanismes régissant le devenir des composés dans l'environnement.

Les recherches de référence sur lesquelles se base en partie cette partie du manuscrit sont celles des travaux nord-américain de Pennington, J. C., et al., (2006)[308], de Kalderis, et al., (2011). Pichtel, J. (2012), et celles exposées dans les documents émanant du projet européen KORA[309], porté par l'Allemagne, sur l'atténuation naturelle, comportant un volet spécifique aux pollutions nitroaromatiques (NAC) dont les résultats remarquables ont été publiés en 2008 et malheureusement non traduits de l'allemand.

[308] Pennington, J. C., Jenkins, T. F., Ampleman G. et al., (2006). *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: final report.* ERDC TR-06-13, US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss, USA, 2006.

[309] Joos, A. (2008). KORA. Themenverbund 5 (TV5), *op. cit.*

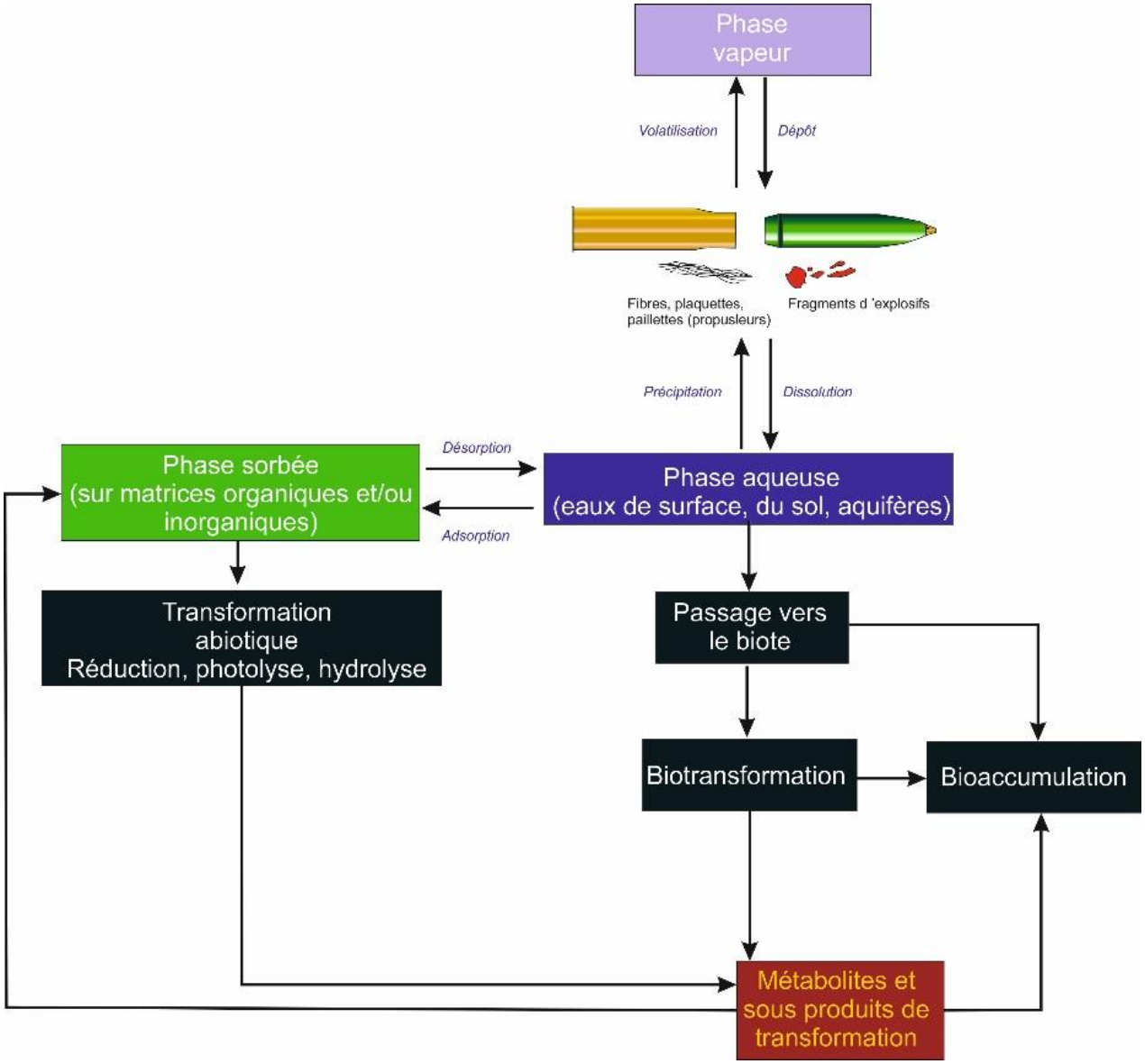


Figure 64 : Mécanismes contrôlant le devenir spatial et temporel des composés énergétiques[310].

[310] D'après Pichtel, J. (2012). *Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. Applied and Environmental Soil Science,* vol. 2012, Article ID 617236, 33 pages, 2012. https://doi.org/10.1155/2012/617236, modifié.

2. Processsus de transformation biotiques et abiotiques

2.1. COMPOSES NITROAROMATIQUES

2.1.1 Transformation du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT)

Le 2,4,6-trinitrotoluène est sans conteste la substance énergétique, entrant dans les formulations des explosifs, produite et utilisée aux tonnages les plus élevés durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental. Les explosifs à base de TNT dotaient les Artilleries et unités du Génie de tous les protagonistes.

Transformation réductive (abiotique)

Les NAC sont des raretés dans la nature[311]. Avec l'accroissement du nombre de groupements nitro-(NO_2^-) électro-attractifs, le déficit en électrons du cycle benzénique augmente et avec lui, le caractère xénobiotique et la persistance de la molécule. La transformation oxydative de ces composés hautement nitrés est rendue difficile au profit de réactions réductives qui suivent des cheminements divers d'une grande complexité, se traduisant *in fine* par un large spectre de sous-produits.

Le TNT se transforme rapidement dans l'environnement du fait de l'occurrence dans sa structure moléculaire de groupements nitro- (NO_2-) qui jouent comme des attracteurs d'électrons (groupements électrophiles) qui inhibent l'oxydation du radical méthyl du cycle benzénique et favorisent la transformation des radicaux nitro- (NO_2-) en radicaux amino- (NH_2-). Les radicaux 2-, et 4- du TNT sont d'abord réduits dans des conditions faiblement réductrices en radicaux amino- alors que les sous-produits de cette réduction sont hautement réactifs (groupements hydroxylamino- et nitroso-) ou se condensent (groupement azoxyl-). La réduction peut concerner un radical nitro- (formation des 2-amino-4,6-dinitrotoluène et 4-amino-2,6-dinitrotoluène (ADNT)), deux radicaux (formation des isomères du diamino-nitrotoluène (DANT)) ou encore les trois radicaux (formation du triaminotoluène (TAT))[312]. Mais c'est en général la formation des ADNT qui est thermodynamiquement favorisée et s'observe très fréquemment dans les sols et les eaux polluées par le TNT[313].

Cette réduction peut s'opérer dans les environnements naturels faiblement réducteurs par voie biotique comme abiotique. Juhasz and Naidu (2007)[314] estiment qu'il est quasiment impossible de distinguer les transformations issues de chacune des deux voies.

La transformation abiotique réductive du TNT est bien documentée et nécessiterait la présence d'un catalyseur comme le fer, les minéraux argileux et certaines molécules organiques[315].

---

[311] Pichtel, J. (2012), *op. cit.*

[312] *Ibid.*

[313] Reifler R. G. and Smets, B. F. (2000). *Enzymatic reduction of 2,4,6-trinitrotoluene and related nitroarenes: kinetics linked to one-electron redox potentials. Environmental Science and Technology,* vol. 34, no. 18, pp. 3900–3906, 2000.

[314] Juhasz, A. L. and Naidu, R. (2007). *Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 191, pp. 163–215, 2007.

[315] Gregory, K. B., Larese-Casanova, P., Parkin, G. F., and Scherer, M. M. (2004). *Abiotic transformation of hexahydro-1,3,5-trinito-1,3,5-triazine by Fe II bound to magnetite. Environmental Science and Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1408–1414, 2004.

Transformation réductive (biotique)

Une grande variété de microorganismes, et notamment les bactéries et les champignons, est connue pour être impliquée dans la biotransformation, voire la biodégradation des composés énergétiques. Les nitroréductase (enzymes) qui catalysent la réduction biotique des radicaux nitro- en radicaux amino- sont ubiquitaires chez les organismes supérieurs et les bactéries. La plupart des nitroreductases ne sont pas spécifiques. Le TNT sert de support carboné et/ou de source d'azote pour les microorganismes (voie métabolique) mais peut aussi s'opérer par co-métabolisme lors de la dégradation d'une autre molécule carbonée.

Crawford (1995)[316], Kalderis et al. (2011)[317], et Juhasz and Naidu (2007)[318] ont identifiés plusieurs séquences de biotransformation pour le TNT. Le TNT (❶) (cf. Figure 65 page suivante) est dégradé de façon séquentielle en 4-nitroso-2,6- dinitrotoluène et 4-hydroxylamino-2,6-dinitrotoluène et 2-hydroxylamino-4,6-dinitrotoluène(❷), instables, qui se transforment en 4-amino-2,6-dinitrotoluène et 2-amino-4,6-dinitrotoluène (❸) par réduction. Les sous-produits de premier rang sont en général très réactifs et peuvent se transformer à leur tour en composés apolaires peu solubles comme les composés azo-, azoxy- (❹❺), qui condensent et/ou se lient de façon irréversibles à la matière organique. L'étape (❶ → ❷) ne relève d'aucune importance environnementale du fait des cinétiques de dégradation très élevées pour ces composés.

Le troisième radical nitro- peut être réduit dans des conditions fortement réductrices (Eh<-200eV) avec production de triaminotoluènes[319]. A noter que la réactivité des intermédiaires peut être réduite par les effets de sorption sur les surfaces de colloïdes[320]. Les sous-produits générés par la transformation anaérobie du TNT, et en particulier les triaminotoluènes, ont une propension, en présence d'oxygène, à polymériser puis de se lier fortement, par chimie-sorption, aux composés humiques du sol. Ce couplage entre transformation réductive puis passage des sous-produits en conditions aérobies en présence de matière organique est à la base de nombreux procédés de traitement des sols pollués par le TNT (compostage)[321], le TNT perdant ainsi lié sa mobilité et ses propriétés toxiques.

---

[316] Crawford, R. L. (1995). « Biodegradation of nitrated munitions compounds and herbicides by obligately anaerobic bacteria » In *Biodegradation of Nitroaromatic Compounds*, J. C. Spain, Ed., Plenum Press, New York, NY, USA, 1995.

[317] Kalderis, D., Juhasz, A. L., Boopathy, R., and Comfort, S. (2011). *Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report). Pure and Applied Chemistry*, vol. 83, no. 7, pp. 1407–1484, 2011.

[318] Juhasz, A. L. and Naidu, R. (2007). *Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 191, pp. 163–215, 2007.

[319] Crawford, R. L. (1995). « Biodegradation of nitrated munitions compounds and herbicides by obligately anaerobic bacteria », *op. cit.*

[320] Pennington, J. C., Jenkins, T. F., Ampleman G. et al., (2006). *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: final report*. ERDC TR-06-13, US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss, USA, 2006.

[321]Boopathy, R. (2000). *Bioremediation of explosives contaminated soil. International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 46, Issue 1, 2000, pp. 29-36, ISSN 0964-8305, https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00051-2.

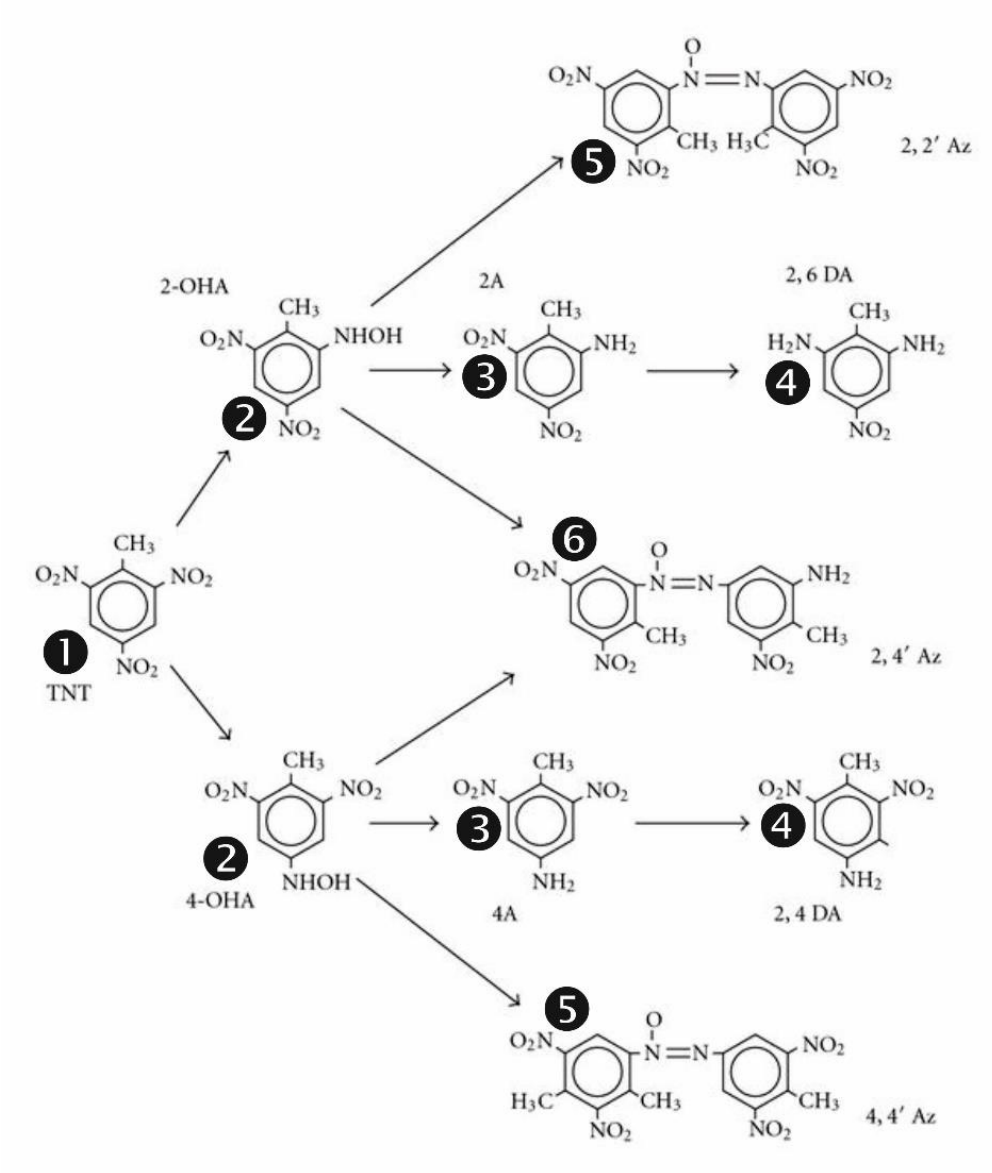


Figure 65 : Biotransformation séquentielle du TNT[322].

Oxydation biotique

Des études tendent à montrer que l'oxydation biotique est possible par la démethylation du radical toluène. Lors du compostage de sols pollués par le TNT, les métabolites polaires ont été identifiés, en relation avec l'activité du genre bactérien *Mycobacter*. Won et al., (1974)[323] montrent que trois types de bactéries assimilables aux *Pseudomonas* sont susceptibles d'oxyder le TNT de façon métabolique. Cette oxydation est de prime importance en ce qui concerne le potentiel danger des pollutions des sols par les TNT car en effet, elle génère des métabolites polaires solubles dans l'eau qui peuvent ainsi transiter des sols vers les eaux souterraines : les métabolites polaires les plus fréquemment rencontrés sont les acides 4-amino-2,6-dinitrobenzoïque, le 2,4,6-trinitrobenzylalcool, le 4-amino-2,6-dinitrobenzylalcool.

[322] D'après Pichtel, J. (2012), *op. cit.*

[323] Won, W.D., Heckly, R.J., Glover, D.J., and Hoffsommer, J.C. (1974). *Metabolic disposition of 2,4,6-trinitrotoluene. Appl. Microbiol*. 27:13-66.

2.1.2 Minéralisation du TNT. Mythe ou réalité ?

S'il est certain que le TNT se transforme dans l'environnement en des sous-produits, principalement les composés amino- , il n'existe aucune démonstration, en dehors de conditions expérimentales au laboratoire, que le processus de transformation aboutisse à son terme à une minéralisation totale dans les systèmes aquifères (absence de toute liaison organique C – C)[324]. Le TNT et ses sous-produits de transformation sont ainsi considérés comme des composés persistants. La minéralisation peut potentiellement s'opérer dans les sols (zone non saturée) et dans certaines conditions physico-chimiques et microbiologiques bien spécifiques. Il a été démontré que si l'activité bactérienne est principalement en cause dans la production de métabolites, la minéralisation, impliquant la scission du noyau benzénique, peut s'opérer par l'action de champignons micromycètes délignifiant (exemple sur la Figure 67) du genre *Phanerochaeta chrysosporium*[325]. Cette action est le fait d'un système lignitolytique enzymatique complexe[326], formé par un ensemble de peroxydases (lignine-peroxydase, peroxydase mangano-dépendantes) et d'oxydases (laccase) catalysant la dégradation de la lignine du bois. Cette action se produit en conditions réductrices sur les métabolites 4-ADNT et 2-ADNT.

Figure 66 : Champignon blanc délignifiants (aperçu photographique)[327].

Cette étape de réduction et les réactions d'acylation produisent une grande variété de composés formylés et acétylés[328]. Le 2-amino-4-formaido-6-nitrotoluène peut alors être utilisé à des fins métabolique comme substrat de la lignine-peroxydase. La peroxydase mangano-dépendante peut utiliser directement le 4-ADNT pour la minéralisation comme cela été montré avec la lignine-peroxydase de *Nematoloma frowardii*[329]. Plus récemment des enzymes intracellulaires, impliquées dans la minéralisation du TNT ont aussi été identifiées. La minéralisation du TNT a été testée dans de nombreux essais au laboratoire impliquant plus de 32 genres de champignons avec des résultats probants pour les basidiomycètes de la litière forestière.

---

[324] Gregory, K. B., Larese-Casanova, P., Parkin, G. F., and Scherer, M. M. (2004). *Abiotic transformation of hexahydro-1,3,5-trinito-1,3,5-triazine by Fe II bound to magnetite. Environmental Science and Technology,* vol. 38, no. 5, pp. 1408–1414, 2004.

[325] Fernando, T., J. A. Bumpus, and S. D. Aust. (1990). *Biodegradation of TNT (2,4,6- trinitrotoluene) by Phanerochaete chrysosporium. Appl. Environ. Microbiol*. 56:1666-1671.

[326] Bumpus J. A., and M. Tatarko (1994). *Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene by Phanerochaete chrysosporium: identification of initial degradation products and the discovery of a TNT metabolite that inhibits lignin peroxidases. Curr. Microbiol.* 28:185-190.

[327] Scanning electron micrograph (SEM) depicts Phanerochaete chrysosporium fungi; Mag. .5x. Photograph courtesy of UC Reagents. https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:040504062021.jpg

[328] Hawari, J., Halasz, A., Beaudet, S., Ampleman, G., and Thiboutot. S. (1999). *Biotransformation of 2,4,6,-trinitrotoluene (TNT) with Phanerochaete chrysosporium in agitated cultures at pH 4.5. Appl. Environ. Microbiol.* 65:2977-2986.

[329] Scheibner, K., Hofrichter, M. and Fritsche, W. (1997). *Mineralization of 2-amino-4,6- dinitrotoluene by manganese peroxidase of the white-rot fungus Nematoloma frowardii. Biotechnol Lett*. 19:835-839.

Ces mécanismes trouvent une application dans le traitement biologique des sols et des eaux polluées par les di- et tri-nitrotoluènes (compostage avec matières ligneuses). L'efficacité de la dégradation biotique dans les sols dépend :

- de la physico chimie des sols (teneurs en matière organique, humus, pH, teneur en eau, teneurs en nutriments etc.), de la biodisponibilité des composés pour les bactéries et champignons des sols et de la biomasse et de l'activité de la microfaune et microflore des sols,

- de la tolérance des microorganismes eu égard à la toxicité du milieu ; en effet, des études portant sur des sols fortement pollués ont mis en évidence un allongement significatif des demi-vies. Dans les gammes de teneurs < 50 mg TNT.kg^{-1} MS, de nombreux essais batch sur des sols de provenance diverses ont conduit à des demi-vies sensiblement similaires, attestant ainsi que le milieu de l'essai n'est pas inhibiteur de l'activité biologique.

Les processus de transformation des NAC en zone saturée (nappe), jouent, comparativement avec ceux de la zone non saturée (sols), qu'un rôle très secondaire dans l'atténuation naturelle de ces composés[330].

2.1.3 Autres mécanismes abiotiques de transformation du TNT

L'hydrolyse est un mécanisme réactionnel dans lequel les molécules d'eau réagissent avec les groupes fonctionnels des molécules organiques pour former de nouvelles liaisons oxygène – carbone. Les groupements fonctionnels susceptibles de réagir par hydrolyse sont les amines, amides, nitriles et les acides carboxylique. Les NAC, les amines aromatiques et le benzène sont généralement résistants[331]. L'hydrolyse des composés nitroaromatiques comme le TNT peut avoir lieu uniquement dans des conditions de pH très élevés (pH > 11), des conditions qui ne sont pas réunies dans les environnements naturels.

Les NAC sont photosensibles. La photolyse est un mécanisme abiotique qui joue un rôle important dans la transformation de ces composés dans les environnements de surface[332]. Il s'agit de la dégradation abiotique des molécules sous l'action du rayonnement lumineux. Elle provoque des hydroxylations et des pertes de chaînes aliphatiques (pour le cas des hydrocarbures).

Ce phénomène concerne les molécules photosensibles comme certaines amines aromatiques. La phototransformation du TNT se traduit par la formation d'une vaste gamme de composés parmi lesquels les nitrobenzènes, les benzaldéhydes, les acides azoxydicarboxyliques et les nitrophénols résultant de l'oxydation du groupement fonctionnel méthyl et la réduction des radicaux nitro- et de phénomènes de dimèrisation[333].

---

[330] Joos, A. (2008). KORA. Themenverbund 5 (TV5), *op. cit.* p.40.

[331] Juhasz, A. L. and Naidu, R. (2007). *Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 191, pp. 163–215, 2007.

[332] McGrath, C. J. (1995). *Review of formulations for processes affecting the subsurface transport of explosives. Tech. Rep*. IRRP-95-2, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, USA, 1995.

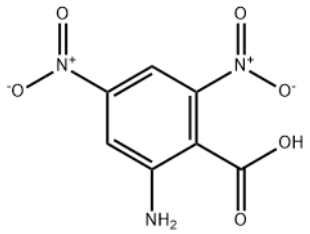
[333] *Ibid.*

Il s'agit d'un processus réactionnel qui se met en place assez rapidement et semble s'accélérer lorsque le TNT est mêlé au sol. La photolyse se réalise à la surface des matrices solides produisant de très nombreux composés polaires, solubles, comme peuvent alors être mobilisés vers les eaux de surface et/ou les eaux souterraines[334].

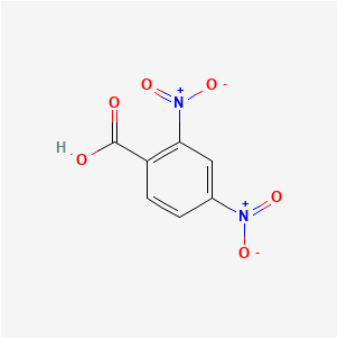
Le TNT peut être photoxydé en acide 2,4,6-trinitrobenzoïque qui peut être dans certaines conditions décarboxylé en 2,4,6-trinitrobenzène lui-même pouvant se réduire en 3,5-dinitroaniline. A ce stade du processus, l'ouverture du cycle peut se produire et ce composé se minéraliser. La photolyse du TNT dans les environnements de surface génère des métabolites renfermant des groupements chromophores à l'origine de la teinte rose à rouges des eaux polluées exposées à la lumière (cf. Figure 67 ci-contre).

Figure 67 : Les eaux roses, marquées par la présence de sous-produits de phototransformation du TNT[335].

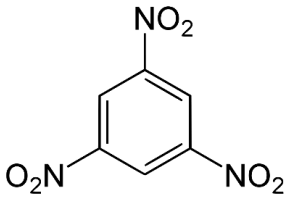
Les acides nitrobenzoïques (comme les acides 2-amino-4,6-dinitrobenzoïque (2-A-4,6-DNBA) 2,4-dinitrobenzoïques (2,4-DNBA)), le 1,3,5-trinitrobenzène et l'acide 3,3,5,5-tetranitroazoxybenzene-2,2-dicarboxylique sont caractéristiques des sous-produits de la phototransformation du TNT (cf. Figure 68).



Acide 2-amino-4,6-dinitrobenzoïque (2-A-4,6-DNBA)



Acide 2,4-dinitrobenzoïques (2,4-DNBA)



1,3,5-Trinitrobenzène

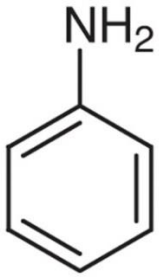
Figure 68 : Formules structurales de quelques composés issus de la phototransformation du TNT. Transformation biotique et abiotique des dinitrotoluènes.

[334] Pennington, J. C., Jenkins, T. F., Ampleman G. et al., (2006). *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: interim report 6.* TR 06-12, Strategic Environmental Research and Development Program, US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss, USA, 2006.

[335] US EPA. *Explosives. Overview of Environmental Issues Associated with Residues of Energetic Materials*. https://clu-in.org/characterization/technologies/exp.cfm

2.1.4 Mécanismes de transformation des isomères du dinitrotoluène

Les principaux isomères (parmi les six isomères 2,3-, 2,4-, 2,5-, 2,6-, 3,4- et 3,5-dinitrotoluènes (DNT)) du DNT utilisés en pyrotechnie et rencontrés dans l'environnement sont les 2,4- et 2,6-DNT. Les 2,4- / 2,6-dinitrotoluènes subissent dans les environnements de surface, au même titre que le TNT, une phototransformation, mais qui s'opère uniquement en phase aqueuse. Les DNT se transforment aussi par réduction abiotique en deux étapes générant des nitroso-benzènes et des n-hydroxylanilines intermédiaires pour former ensuite l'aniline (cf. Figure 69, formule structurale ci-contre).



De nombreuses recherches ont été diligentées concernant la biodégradation des isomères du dinitrotoluène, notamment dans les années 90 et à des fins de développement de procédés de traitement des matrices polluées par ces composés[336]. Il a été démontré qu'il peut se dégrader en conditions aérobies (voie oxydative) comme anaérobies. En aérobiose, le 2,4- tout comme le 2,6-dinitrotoluène sont susceptibles de perdre les groupements fonctionnels nitro- en générant des nitrites (NO_2^-) et des catéchols (cf. Figure 69 ci-contre). En anaérobiose, on observe une réduction co-métabolique des groupements fonctionnels nitro-

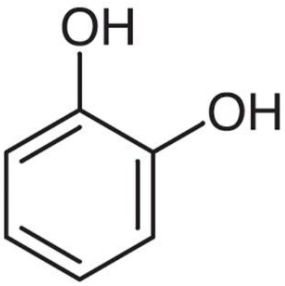


Figure 69 : Formules structurales de l'aniline (en haut) et du catéchol (en bas).

Cette réduction produit des composés aux groupements nitroso- (R-N = O), aminonitro-, diamino- et azoxy- (R-N=N.O-R). Si le DNT peut se dégrader rapidement dans des conditions expérimentales au laboratoire, une persistance dans les sols pollués est souvent observée, contribuant par la lixiviation par infiltration des eaux météoriques, à dégrader la qualité des eaux souterraines[337]. L'essentiel des essais de biodégradation au laboratoire sur le DNT visent des concentrations relativement élevées (dans les gammes de celles rencontrées dans les sites industriels pollués par le DNT, 9 100 à 182 000 µg.L^{-1}).

[336] Lendenmann, U., Spain, J. C. and Smets, B. F. (1998). *Simultaneous biodegradation of 2,4-dinitrotoluene and 2,6-dinitrotoluene in an aerobic fluidized-bed biofilm reactor. Environmental Science and Technology,* vol. 32, no. 1, pp. 82–87, 1998.

[337] Yang, H., Halasz, A., Zhao, J.S., Monteil-Rivera, F., Hawari, J. (2008). *Experimental evidence for in situ natural attenuation of 2,4- and 2,6-dinitrotoluene in marine sediment. Chemosphere*, Volume 70, Issue 5, 2008, pp 791-799, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.014. Amaral, H.I.F., Fernandes, J., Berg, M., Schwarzenbach, R.P., Kipfer, R. (2009). *Assessing TNT and DNT groundwater contamination by compound-specific isotope analysis and 3H–3He groundwater dating: A case study in Portugal. Chemosphere*, Volume 77, Issue 6, 2009, pp. 805-812, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.011.

Han et al., (2011) démontrent, via deux dispositifs expérimentaux (colonne et chemostat) que les limites de la biodégradation (la concentration la plus basse en DNT capable d'entretenir l'activité et la croissance des bactéries impliquées dans sa dégradation) pour les deux isomères 2,4- et 2,6-DNT seraient, dans les conditions des expérimentations, de 9,828 ± 0,91 µg.L^{-1}/10,374 ± 1,456 µg.L^{-1}pour le 2,4-DNT et de 7,098 ± 0,91 µg/L / 4,732 ± 2,366 µg.L^{-1}pour le 2,6-DNT[338].

Ainsi aux basses concentrations (ng.L^{-1}), il est vraisemblable que les isomères du DNT soient persistantes dans les eaux souterraines.

2.1.5 Biodégradation des nitrobenzènes et nitronaphtalènes

Nitrobenzènes

Les réactions enzymatiques impliquées dans la biodégradation des nitrobenzènes sont connus et ont fait l'objet de nombreuses recherches[339]. En ce qui concerne les 1,3-dinitrobenzène (1,3-DNB) et 1,3,5-trinitrobenzène, il existe très peu de publications au sujet de leur comportement environnemental ; une étude s'attache à expliquer les mécanismes de dégradation[340]. Au regard de ces éléments, deux voies de dégradation semblent être possibles :

- L'élimination du radical nitro- en conditions aérobies, puis minéralisation après ouverture du cycle benzénique; pour le 1,3-DNB, la minéralisation n'a pas été observée, seule la dihydroxylation du radical nitro- a pu être constatée,

- La réduction (anaérobie) des groupements fonctionnels nitro- par des enzymes nitrates-réductases puis formation des composés amino- et aminonitro-. Pour cette voie la réduction implique que les nitrobenzènes servent d'accepteur d'électrons et donc que dans le milieu hôte existe un donneur d'électrons carbonés facilement disponible pour les consortia bactériens. La réduction partielle conduit du nitrobenzène à la formation de d'hydroxylaminobenzène par des nitrobenzène-nitrate réductases. L'ammonium (NH_4^+) généré n'est éliminé que durant la phase de minéralisation qui voit d'abord l'ouverture du cycle benzénique.

Contrairement aux nitrotoluènes, la séparation des deux voies de dégradation n'est pas claire. Il n'existe aucune étude dans la littérature scientifique concernant une éventuelle humification et/ou oligomérisation des produits de réduction des nitrobenzènes.

Nitronaphtalènes

Il n'existe aucune publication scientifique relative au comportement environnemental des nitronaphtalènes renfermés dans certains explosifs utilisés durant la Première Guerre mondiale. La réduction des mononitronaphthalènes en naphthylamines est pressentie. Les incertitudes concernant le potentiel de dégradation concernent surtout les dinitro- et trinitro-naphthalènes.

---

[338] Han, S., Mukherji, S.T., Rice, A., Hughes, J.B. (2011). *Determination of 2,4- and 2,6-dinitrotoluene biodegradation limits. Chemosphere*, Volume 85, Issue 5, 2011, pp. 848-853, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.100.

[339] Spain, J. C. (ed.). (1995). *Biodegradation of nitroaromatic compounds. Environmental Science Research Series*, Vol. 49, Plenum Press, New York. Nishino, S. F., Spain, J. C. and He, Z. (2000) Strategies for aerobic degradation of nitroaromatic compounds by bacteria: process discovery to field application. 7-62.

[340] Dickel, O., and Knackmuss. H.-J. (1991). *Catabolism of 1,3-dinitrobenzene by Rhodococcus sp. QT-1. Arch. Microbiol.* 157:76-79.

Les amino-nitronaphthalènes et diamino-naphthalènes, ont été recherchés dans des sols et des eaux sur des sites pollués par les nitronaphtalènes, mais n'ont pas été détectés (Bausinger, non publié). Les naphthylamines ont été détectés dans de nombreux échantillons. Il est vraisemblable que les nitronaphtalènes aient un comportement similaire à celui des TNT et nitrobenzènes, les solubilités étant par ailleurs semblables.

2.1.6 Biodégradation des composés nitroaromatiques polaires

Bien que le 2,4,6-trinitrophénol ait été avec le TNT l'un des explosifs très majoritairement utilisé lors de la Grande Guerre, peu d'études cherchent à comprendre le devenir environnemental de cette molécule. Les recherches se focalisèrent sur des composés mono- et di- nitrés potentiellement présents dans notre environnement en lien avec des usages modernes et non pyrotechniques de ces substances. Il existe de nombreuses études portant sur la dégradation biotique en aérobie des mononitrophénols**.** La dégradation biotique oxydative des 2-NP[341] et 4-NP[342] s'effectue souvent par scission du radical nitro- par des mono-oxygènases en produisant des hydroxybenzènes, qui, une fois formé, peuvent être aisément dégradés et minéralisés après ouverture du cycle benzénique. Le chemin de dégradation du 3-NP est différent de celui des 2-NP et 4-NP. De nombreuses études[343] identifient les amino-hydrochinones comme métabolites des mononitrophénols[344]. L'azote est libéré durant ce processus sous forme d'ammonium, même si la dégradation s'opère en aérobie. La réduction de 2-NP en amino-phénol est par ailleurs aussi connue, mais conduit à un mélange de composés qui peuvent être utilisés pour d'autres transformations[345]. Il existe relativement peu de références bibliographiques concernant la biodégradation du 2,6-dinitrophénol (2,6-DNP). La dégradation en conditions aérobies a été démontrée[346]. Les *Pseudomonas* (N26-8) étudiés utilisent le 2,6-DNP comme source d'azote alternative à une source de carbone et d'énergie, en présence d'ammonium. Les cinétiques de dégradation sont peu élevées du fait de la structure du 2,6-DNP et d'autres sources d'azote, plus facilement disponibles, sont, dans un mélange comprenant du 2,6-DNP, toujours privilégiées.

La biodégradation des 2,4-DNP (2,4-dinitrophénol) et 2,4,6-TNP (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*) est relativement bien étudiée et représentée[347]. Aucune voie aérobie n'a été identifiée pour ces deux composés. La minéralisation s'opère sur les métabolites obtenus en conditions anaérobies, par hydrogénation du noyau benzénique. Les composés chimiquement instables ainsi obtenus (dihydrite-Meisenheimer-complexes du 2,4,6-TNP) produisent par réaromatisation enzymatique en libérant un groupement nitro- NO_2^-. Le 2,4,6-TNP se transforme alors en complexe hydrite du 2,4-DNP.

---

[341] Zeyer, J., and Kearney, P. C. (1984). *Degradation of o-nitrophenol and m-nitrophenol by a Pseudomonas putida. J. Agric. Food Chem*. 32:238-242.

[342] Spain, J. C., Hughes, J.B. Knackmuss, H.-J. (2000). *Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives.* CRC Press, Boca Raton.

[343] Nitrophenol Family Pathway Map (an/aerobic) http://eawag-bbd.ethz.ch/nphe/nphe_map.html

[344]Schenzle, A. & Lenke, H & Fischer, P & Williams, Peter & Knackmuss, H.-J. (1997). *Catabolism of 3-Nitrophenol by Ralstonia eutropha JMP 134. Applied and environmental microbiology*. 63. 1421-7. 10.1128/AEM.63.4.1421-1427.1997.

[345] Karim K, Gupta SK (2001). *Biotransformation of nitrophenols in upflow anaerobic sludge blanket reactors. Bioresour Technol*. 2001 Dec;80(3):179-86. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00092-x. PMID: 11601541.

[346] Bruhn C, Lenke H, Knackmuss H. (1987). *Nitrosubstituted Aromatic Compounds as Nitrogen Source for Bacteria. Appl Environ Microbiol 53* :. https://doi.org/10.1128/aem.53.1.208-210.

[347] Gesche, H., Hofmann K.W., Trachtmann, N., Walters, D.M., Rouvière, P. and Knackmuss, H.J. (2002). *npd gene functions of Rhodococcus (opacus) erythropolis HL PM-1 in the initial steps of 2,4,6-trinitrophenol degradation bbThe GenBank accession number for the sequence reported in this paper is AF435009. Microbiology.* Volume 148, Issue 3. https://doi.org/10.1099/00221287-148-3-799.

Le processus de dégradation se poursuit par une hydrogénation puis une scission du noyau benzénique en 4,6-dinitrohexanoate, lui-même alors aisément minéralisé. Ce processus a été confirmé ensuite en 2004[348].

L'identification d'accumulation d'autres métabolites comme le 2-amino-4-nitrophénol (2-A-4-NP), la 2,4,6-trinitrocyclohexanone ou la 4,6-dinitrohexanoate atteste de l'existence d'autres voie de biodégradation. Le fait que la dégradation réductive métabolique des 2,4-DNP, TNP n'a été observée que chez un nombre restreint de bactéries est vraisemblablement en relation avec la nécessaire implication du rare cofacteur F420, uniquement présent dans certaines archéo- et cyano-bactéries, toutes bactéries Gram-positif, en particulier *Genera Rhodococcuc,* et *Nocardsides*[349] alors qu'aucune bactérie Gram-négatif n'a été identifiées. Les représentant des bactéries dans les eaux souterraines sont essentiellement des protéobactéries Gram-négatif, environnement dans lequel les DNP et TNP peuvent alors persister.

2.2. TRANSFORMATION DES ADJUVANTS / STABILISANTS DES ERGOLS SOLIDES NITROCELLULOSIQUES

2.2.1 Biotransformation

La nitrocellulose (NC) est extrêmement stable dans l'environnement. La transformation par voie biologique, par l'action de microorganismes, a été démontrée en conditions anaérobies dénitrifiantes[350], sulfato-réductrices[351] et méthanogène[352].

La diphénylamine (DPA) et ses dérivés nitrés (nitrodiphénylamine) sont des polluants couramment rencontrés sur les sites de production et de chargement de munitions tout comme ceux de synthèse de l'aniline[353]. Du fait de ses propriétés anti-oxydantes, la DPA et ses dérivés sont majoritairement utilisés comme stabilisants des ergols nitrocellulosique dans les ergols solides simple, double et triple base, des projectiles d'artillerie et d'armes portatives[354]. Ils ont été largement utilisés durant la Première Guerre mondiale pour stabiliser la nitrocellulose instable (exsudant avec le temps des vapeurs nitrées) des ergols solides.

---

[348] Hofmann, K.W., Knackmuss, H., Heiss, G. (2004). *Nitrite Elimination and Hydrolytic Ring Cleavage in 2,4,6-Trinitrophenol (Picric Acid) Degradation. Appl Environ Microbiol 70*: https://doi.org/10.1128/AEM.70.5.2854-2860.

[349]Hofmann, K.W., Knackmuss, H., Heiss, G. (2004). *Nitrite Elimination and Hydrolytic Ring Cleavage in 2,4,6-Trinitrophenol (Picric Acid) Degradation. Appl Environ Microbiol 70*: https://doi.org/10.1128/AEM.70.5.2854-2860.

[350] Freedman, D. L., J. M. Cashwell, and B. J. Kim (2002). *Biotransformation of explosivegrade nitrocellulose under denitrifying and sulfidogenic conditions. Waste Management 22:* 283-292.

[351] Petrova, O. E., N. B. Tarasova, and M. N. Davydova (2002). *Biotechnological potential of sulfate-reducing bacteria for the transformation of nitrocellulose. Anaerobe 8*:315-317.

[352] Freedman, D. L., B. M. Caenepeel, and B. J. Kim (1996). *Biotransformation of nitrocellulose under methanogenic conditions. Water Science and Technology 34*(5-6): 327-334.

[353] Shin, K.A., Spain, J.C. (2009). *Pathway and evolutionary implications of diphenylamine biodegradation by Burkholderia sp. Strain JS667. Appl Environ Microbiol*. 2009 May ;75(9):2694-704. doi: 10.1128/AEM.02198-08. Epub 2009 Feb 27. PMID: 19251893; PMCID: PMC2681709.

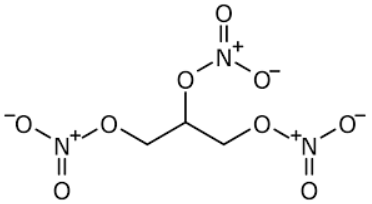
[354] Oliver Drzyzga (2003). *Diphenylamine and derivatives in the environment: a review. Chemosphere*, Volume 53, Issue 8,2003, Pages 809-818, ISSN 0045-6535. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00613-1.

Les informations concernant leur stabilité environnementale, leur biodégradation sont très parcellaires et ont été produites par des expérimentations au laboratoire (à la faveur de recherches portant sur les potentialités de traitement biologique de sol et/ou des eaux polluées par ces composés sur des sites industriels de production).

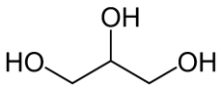
La transformation de la diphénylamine catalysée par voie biologique s'opère aussi bien en conditions aérobies[355] qu'anaérobies[356]. Des souches bactériennes capables de dégrader la DPA à des fins métaboliques, comme source de C et N, ont été isolées[357]. Shin & Spain (2009)[358] propose deux voies de biodégradation de la diphénylamine par des bactéries du genre *Burkholderia*.

La première conduisant à la rupture de la liaison diphényl et à la production de catéchol et d'aniline**,** des composés ensuite aisément minéralisables en conditions aérobies. La seconde, produit des composés diphénylamine-2,3-dihydrodiol.

La nitroglycérine (NG) (cf. Figure 70) est relativement soluble (> 1 g $NG.L^{-1}$). Dès lors que la NG est dissoute dans l'eau, elle peut être dégradée par l'action de nombreuses bactéries et champignons, en conditions aérobies ou anaérobies[359]. La biodégradation des esters nitrés s'effectue par des dénitrations successives, chaque groupement nitro- réagissant alors plus lentement que le précédent[360].



1,2,3-tris-nitrooxy-propane ou (tri)nitroglycérine



Glycérol

Figure 70 : Formules structurales de la 1,2,3-tris-nitrooxy-propane ou (tri)nitroglycérine et du glycérol.

Ce processus aboutit à la production de glycérol dans certains cas qui peut alors être utilisé par les bactéries comme source de carbone.

---

[355] Gardner, M., Alvarez, G.H., Ku, Y. (1982). *Microbial degradation of ^{14}C-diphenylamine in a laboratory model sewage sludge system. Bull Environ Contam Toxicol* 28:91–96

[356] Mirecki, J., E.; Porter, B., Weiss, Jr., Charles A. (2006). *Environmental Transport and Fate Process Descriptors for Propellant Compounds*, 2006 Jun 01. Drzyzga, O., Blotevogel, K.H. (1997) *Microbial degradation of diphenylamine under anoxic conditions. Curr Microbiol* 35(6):343–347.

[357] Perruchon, C., Batianis, C., Zouborlis, S. et al., (2015). *Isolation of a diphenylamine-degrading bacterium and characterization of its metabolic capacities, bioremediation and bioaugmentation potential. Environ Sci Pollut* Res 22, 19485–19496 (2015). https://doi.org/10.1007/s11356-015-5132-0.

[358] Shin, K.A., Spain, J.C. (2009). *Pathway and Evolutionary Implications of Diphenylamine Biodegradation by Burkholderia sp. Strain JS667. Appl Environ Microbiol 75:* https://doi.org/10.1128/AEM.02198-08.

[359] Accashian, J.V., Vinopal, R.T., Kim, B., Smets, B.F. (1998). *Aerobic Growth on Nitroglycerin as the Sole Carbon, Nitrogen, and Energy Source by a Mixed Bacterial Culture. Appl Environ Microbiol* 64: https://doi.org/10.1128/AEM.64.9.3300-3304.1998. Christodoulatos, C. Bhaumik, S., Brodman, B. W. (1997). *Anaerobic biodegradation of nitroglycerin. Water Research,* Volume 31, Issue 6, 1997, pp.1462-1470, ISSN 0043-1354, https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00390-9. Marshall, S.J., White, G.F. (2001). *Complete denitration of nitroglycerin by bacteria isolated from a washwater soakaway. Appl Environ Microbio*l. 2001 Jun;67(6):2622-6. doi: 10.1128/AEM.67.6.2622-2626.2001.

[360] Wendt, T.M. Cornell, J.H. and Kaplan, A.M. (1978). *Microbial degradation of glycerol nitrates. Applied and Environmental Microbiology*, vol. 36, no. 5, pp. 693–699, 1978.

La réaction implique la perte successive des radicaux nitro-, libérant des nitrites (NO_2^-) en solution[361]. Le produit final issu de la dénitrification est le glycérol (cf. Figure 70). Les nitrites sont rapidement oxydés en nitrates en présence d'oxygène, comme constaté dans la grande majorité des aquifères.

Des intermédiaires de dégradation di- (dinitroglycérine, (DNG)) et mono- nitrés (mononitroglycérine ou glycérine mono-nitrate (GMN)) ont été identifiés dans des sols pollués par la NG[362].

La question du comportement environnemental de la nitroglycérine reste peu étudiée et de nombreuses incertitudes subsistent sur sa persistance et sa mobilité dans les sols et les eaux souterraines. En effet, s'il a été démontré au laboratoire que la NG se dégradait rapidement, des teneurs élevées dans les sols sur certains sites industriels - de nombreuses années après leur fermeture - questionnent sur la transposabilité des études du laboratoire à l'échelle du terrain. Enfin, les taux de biodégradion de la NG restent peu étudiés et peu connus à l'échelle des sites, notamment du fait des difficultés liées à la sécurité des diagnostics sur les sites pollués par la NG (risques d'explosion liés à la sensibilité de la NG aux chocs et aux frictions).

La biodégradation de la nitroguanidine (NIGU) est une préoccupation ancienne. Les premiers travaux de recherche menées aux USA par l'*United States Natick Research and Development Center,* Natick, Massachusetts, datent de 1985 en lien avec des pollutions de sites industriels de production de la NIGU. Les premiers essais sur des concentrations très élevées (150 $mgNIGU.L^{-1}$) en présence d'un substrat carboné (glucose) montrent que les microorganismes sont capables de réduire la NIGU. Il a été démontré que sans amendement, la NIGU n'est pas dégradée en conditions aérobies, anaérobies dénitrifiantes, sulfato-réductrices et méthanogènes[363]. La NIGU serait dégradée par co-métabolisme en conditions aérobies dans les eaux naturelles[364].

Les essais colonne réalisées au laboratoire dans le cadre de recherches portant sur l'optimisation de traitement biologique de sols pollués par la NIGU, en conditions aérobies comme anaérobies, montrent que la NIGU se décomposerait partiellement et se transformerait majoritairement en nitrosoguanidine, à laquelle s'associerait la mélamine, cyanamide, et cyanoguanidine, ces dernières résultant probablement de la transformation abiotique de la NIGU[365].

---

[361] White, G.F., Snape, J.R., Nicklin, S. (1996). *Bacterial biodegradation of glycerol trinitrate. International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 38, Issue 2, 1996, pp. 77-82, ISSN 0964-8305, https://doi.org/10.1016/S0964-8305(96)00028-5.

[362] Blehert, D. S. Becker, K. and Chambliss, G. H. (1996). *Isolation and characterization of bacteria that degrade nitroglycerin. In Proceedings of the Tri-Service Environmental Technology Workshop. Enhancing Readiness through Environmental Quality Technology*, pp. 197–204, Defense Technical Information Center, Hershey, Pa, USA, May 1996, ADP017715.

[363] Adrian, N. R. (1996). *The biodegradation of propellants M31A1E1 and NOSIH-AA2 in compost, soil slurries, and liquid cultures. Technical Report 96/83*. Champaign, IL: U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories.

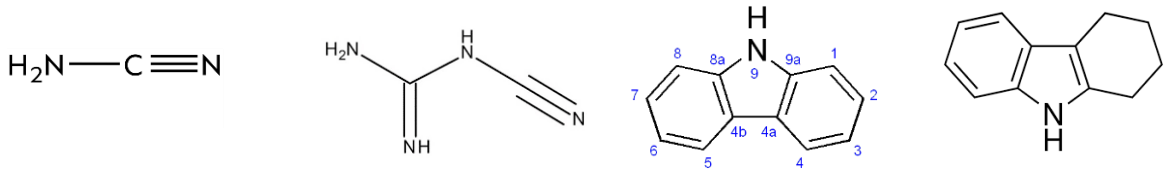
[364] Haag, W.R., Spanggord, R., Mill, T., Podoll, R.T., Chou, T.-W., Tse, D.S. and Harper, J.C. (1990). *Aquatic environmental fate of nitroguanidine. Environmental Toxicology and Chemistry*, 9: 1359-1367. https://doi.org/10.1002/etc.5620091105.

[365] Kaplan, D. L., J. H. Cornell, and A. M. Kaplan (1982). *Decomposition of nitroguanidine. Environmental Science & Technology* 16: 488-492.

2.2.2 Transformation abiotiques

Certains composés nitrés entrant dans les formulations des propulseurs sont réputés photosensibles, en particulier la NIGU[366] et la nitrocellulose. La photolyse intervient donc dans les processus réactionnels de dégradation et de transformation de ces composés dans les environnements de surface. La NIGU en solution aqueuse réagit rapidement dans des conditions de rayonnement solaire naturel en générant, à l'instar des NAC, de nombreux sous-produits comme la nitrosoguanidine, l'hydroxyguanidine, et/ou la cyanoguanidine (cf. Figure 71), jusqu'à la minéralisation en nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-). et ammonium (NH_4^+)[367].

La cyanoguanidine est ensuite photolysée en cyanamide dans le spectre de l'UV[368], un sous-produits fille bien plus toxique que la molécule mère de NIGU et insensible à la dégradation photolytique[369]. La photolyse de la NIGU entraîne donc une toxication de l'environnement de surface dans lequel elle est présente.



Cyanamide Cyanoguanidine Carbazole Tétrahydrocarbazole

Figure 71 : Formules structurales de la cyanamide, cyanoguanidine, du carbazole et du tétrahydrocarbazole.

Les diphénylamine (DPA) et nitrodiphenylamine en solution aqueuse se transforme sous l'action des rayonnements lumineux en carbazole et tetrahydrocarbazole[370] (cf. Figure 71)

La nitrocellulose (NC). exposée à un rayonnement UV, voit sa couleur changer passant de blanc à jaune puis à brun[371]. A l'exception de cette observation d'un changement macroscopique dans l'aspect de la NC, il n'est fait aucune mention dans la littérature scientifique si ces changements visuels s'accompagnent aussi de modification du comportement environnemental de la NC. Enfin, aucune référence bibliographique n'a été identifiée concernant la phototransformation de la nitroglycérine dans les conditions naturelles.

---

[366] Haag, W.R., Spanggord, R., Mill, T., Podoll, R.T., Chou, T.-W., Tse, D.S. and Harper, J.C. (1990). *Aquatic environmental fate of nitroguanidine. Environmental Toxicology and Chemistry*, 9: 1359-1367. https://doi.org/10.1002/etc.5620091105.

[367] Ibid.

[368] Kaplan, D. L., J. H. Cornell, and A. M. Kaplan (1982). *Decomposition of nitroguanidine. Environmental Science & Technology* 16: 488-492.

[369] Burrows, W. D., M. O. Schmidt, R. H. Chyrek, and C. I. Noss. (1988). *Photochemistry of aqueous nitroguanidine. Technical Report 8808 (*ADA-203200). Fort Detrick, MD: U.S. Army Biomedical Research and Development Laboratory.

[370] Drzyzga, O. (2003). *Diphenylamine and derivatives in the environment: a review. Chemosphere* 53: 809-818.

[371] Selwitz, C. (1988). *Cellulose nitrate in conservation. In Research in conservation*. 2. John Paul Getty Trust, CA: The Getty Conservation Institute. Available for download at http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/nitrate.pdf (5 Jun 2005).

2.3. DEGRADATION ENVIRONNEMENTALE DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE

2.3.1 Biodégradation

Depuis plus de 60 ans à présent, nous savons que des microorganismes sont capables de réduire les oxyanions de chlore tel que le perchlorate ClO_4^- et le chlorate ClO_3^- en conditions anaérobies en les utilisant dans leur métabolisme respiratoire. Compte tenu de leur haut niveau d'oxydation, le ClO_4^- ou le ClO_3^- sont utilisés comme accepteurs d'électrons terminaux dans le métabolisme microbien, en conditions strictement anaérobiques (et en absence de tout autre accepteur concurrent) favorisant ainsi leur réduction en formant du Cl^- en fin de réaction[372].

Les données obtenues durant la dernière décennie ont mis en évidence la présence ubiquiste de bactéries réduisant les oxyanions du chlore dans l'environnement[373]. En effet, des bactéries réductrices des ions chlorate et perchlorate ont été isolées de différents habitats comme des sols vierges, des mines d'or, des sédiments de drainage, des sources chaudes, des stations d'épurations d'eaux usées, des sols de jardins… Compte tenu de leur présence ubiquitaire, les conditions de développement et les besoins en nutriments de ces bactéries sont relativement simples. Les bactéries réductrices des ions perchlorate sont capables d'utiliser le nitrate, le chlorate, le perchlorate et l'oxygène (O_2) comme accepteurs d'électrons et entrainer leur réduction, en présence de donneurs d'électrons appropriés ou d'une source de carbone telle que l'acétate[374]. La voie biochimique utilisée par ces bactéries est illustrée par la Figure 72. Les deux premières étapes sont catalysées par une perchlorate réductase, puis le chlorite est dismuté par une chlorite dismutase à l'étape 3 en O_2 et Cl^-.

Les microorganismes ont besoin de diverses sources carbonées et de donneurs d'électrons pour permettre la réduction des oxyanions de chlore. Parmi les donneurs d'électrons organiques connus, il y a l'acétate, lactate, pyruvate, fumarate, succinate, méthanol, éthanol, cellobiose, xylose, pectine, citrate, benzène et le glycérol. Comme donneurs inorganiques important, les bactéries utilisent l'hydrogène, le sulfure d'hydrogène, le Fer II soluble et insoluble, le Fer zéro valent (Fe°), le sulfure, et le thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$)[375].

L'acétate et le lactate constituent les donneurs d'électrons les plus utilisés dans différentes publications[376]. De récentes recherches sur un site industriel ont montré que les bactéries étaient capables de respirer des perchlorates dans les eaux souterraines en dégradant, comme supports carbonés, des solvants chlorés comme le 1,2-dichloréthane (Hellal, J. non publié).

Dans les conditions naturelles, généralement rencontrées dans les systèmes aquifères, à dominance aérobie, les ions chlorate et perchlorate sont persistants.

---

[372] Bruce, R.A., Achenbach, L.A., Coates, J.D. (1999). *Reduction of (per)chlorate by a novel organism isolated from paper mill waste. Environmental Microbiology* 1: 319-329.

[373] Achenbach, L.A., Michaelidou, U., Bruce, R.A., Fryman J., Coates, J.D. (2001). *Dechloromonas agitata gen. nov., sp. nov. and Dechlorosoma suillum gen. nov., sp. nov., two novel environmentally dominant (per)chlorate-reducing bacteria and their phylogenetic position. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 51: 527-533.

[374] Bardiya N, Bae J-H (2011). *Dissimilatory perchlorate reduction: A review. Microbiological Research* 166: 237-254.

[375] *Ibid.*

[376] Sun, Y., Gustavson, R., Ali, N., Weber, K., Westphal, L., Coates, J. (2009). *Behavioral response of dissimilatory perchlorate-reducing bacteria to different electron acceptors. Applied Microbiology and Biotechnology* 84: 955-963. Shrout, J., Scheetz, T., Casavant, T., Parkin, G. (2005). *Isolation and characterization of autotrophic, hydrogen-utilizing, perchlorate-reducing bacteria. Applied Microbiology and Biotechnology* 67: 261-268.

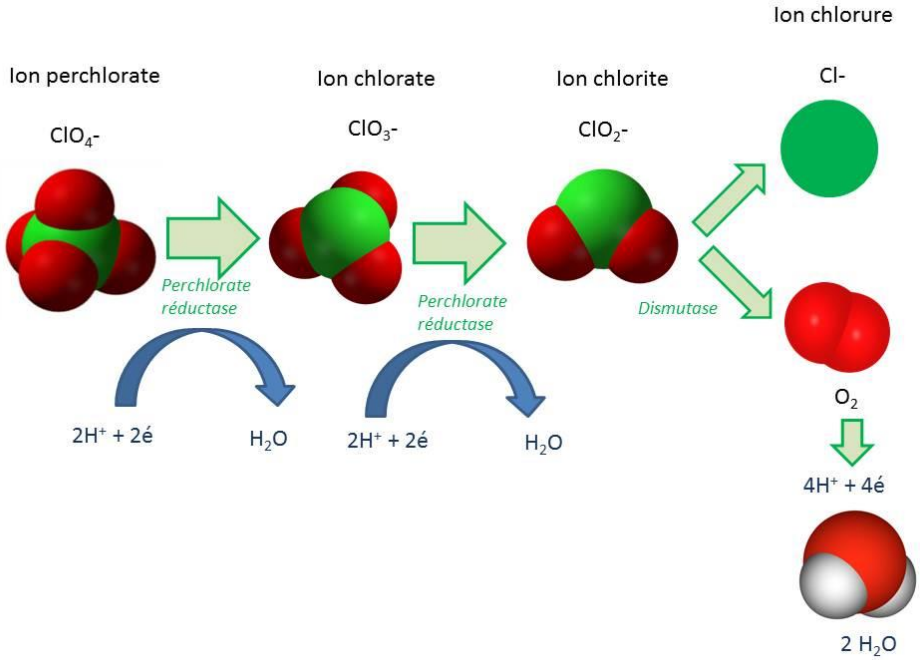


Figure 72 : Voie biochimique de réduction de l'ion perchlorate[377].

2.3.2 Photosensibilité

Dans les environnements de surface, il n'est fait aucune mention de photosensibilité des perchlorate d'ammonium, de perchlorate de potassium et de chlorate de potassium[378].

2.4. DEVENIR ENVIRONNEMENTAL DES IONS NITRATE (NO_3^-) ET AMMONIUM (NH_4^+)

Les ions nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) ne sont pas des espèces inorganiques persistantes dans l'environnement et subissent une dégradation selon plusieurs mécanismes.

2.4.1 La nitrification

L'ammonium NH_4^+ est un ion polyatomique très soluble et mobile dans les sols et les eaux. Toutefois, l'ammonium est généralement transformé en nitrates dans les sols et les eaux par des bactéries dites nitrifiantes (nitrification). L'ammonium est beaucoup moins soluble que les nitrates dû à ses propriétés de complexation (avec les argiles notamment).

Dans un premier temps (NH_4^+) est oxydé par des bactéries du genre *Nitrosomonas*, transformant l'ammonium en nitrites (NO_2^-). D'autres bactéries, apparentées à *Nitrobacter,* oxydent les nitrites en nitrates (NO_3^-). Du fait de leur solubilité élevée, les nitrates peuvent polluer les eaux souterraines et y persister.

---

[377] Bardiya N, Bae J-H (2011).*op. cit,* modifié.

[378] Mirecki, J., E.; Porter, B., Weiss, Jr., Charles A. (2006). *Environmental Transport and Fate Process Descriptors for Propellant Compounds.* U.S. Army Corps of Engineers. ERDC/EL TR-06-7. 2006 Jun 01.

La nitrification se définie comme une oxydation biologique de l'ammonium en nitrite et nitrate ou comme une augmentation de l'état d'oxydation de l'azote[379] réalisée généralement en conditions aérobies . Cette oxydation libère de l'énergie utilisée par les organismes nitrifiants. Deux grands groupes de micro-organismes sont capables de réaliser ce processus : (i) une microflore hétérotrophe (nitrification hétérotrophe) et (ii) une microflore autotrophe (nitrification autotrophe)[380]. Dans les milieux naturels, la nitrification hétérotrophe est généralement moins active que la nitrification autotrophe.

Les bactéries nitrifiantes autotrophes ont été beaucoup plus étudiées et constituent un groupe relativement bien défini physiologiquement. La nitrification autotrophe se décompose en deux étapes successives[381] :

$$NH_4^+ \rightarrow NH_2OH \rightarrow NO_2 \rightarrow NO_3^-$$

Nitritation *Nitratation*

L'ensemble de la chaîne de réactions se réalise en présence d'une source minérale de carbone (CO_2 ou bicarbonates) et fait intervenir des transporteurs d'électrons. Chaque étape de la nitrification est catalysée par un système enzymatique différent. Les nitrates produits peuvent ensuite être dégradés, minéralisés par les processus de dénitrification.

2.4.2 La dénitrification

La dénitrification des nitrates (NO_3^-) en azote (N_2), correspondant à un processus de minéralisation, s'effectue par réduction et par voie biologique, par une série d'étapes impliquant des oxydes gazeux de l'azote. Dans ce processus, les nitrates constituent des accepteurs d'électrons. Les donneurs d'électrons sont en général des composés organiques carbonés biodisponibles et facilement dégradables. La dénitrification est réalisée dans des environnements anoxiques, lorsque le milieu est déficitaire en oxygène et autres accepteurs d'électrons plus énergétiquement favorables ; les bactéries respirent alors les nitrates à défaut d'oxygène, comme accepteur d'électron.

La dénitrification est un processus respiratoire microbien au cours duquel les micro-organismes sont capables de substituer à l'oxygène des formes oxydées de l'azote comme accepteur terminal d'électrons dans leur chaine respiratoire. Les bactéries dénitrifiantes au sens strict sont des bactéries qui possèdent la nitrite réductase, qui sont capables de réduire NO_3^- (nitrate) ou NO_2^- (nitrite) en N_2O (protoxyde d'azote) et/ou N_2 (azote) et qui peuvent utiliser l'énergie libérée au cours de cette réduction pour se développer[382]. Les micro-organismes dénitrifiants sont généralement aérobies ou anaérobies facultatifs.

---

[379] Williams, A.E., Johnson, J.A., Lund, L.J. and Kabala, Z.J. (1998). *Spatial and Temporal Variations in Nitrate Contamination of a Rural Aquifer, California. Journal of Environmental Quality*, 27: 1147-1157. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700050021x.

[380] Garrido, F., Hénault, C., Gaillard, H., Pérez, S., Germon, J.C. (2002). *N_2O and NO emissions by agricultural soils with low hydraulic potentials. Soil Biology and Biochemistry*, Volume 34, Issue 5, 2002, pp.559-575, ISSN 0038-0717, https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00172-9.

[381] Garido et al., (2002), *op. cit.*

[382] Mahne, I., Tiedje, J.M. (1995). *Criteria and methodology for identifying respiratory denitrifiers. Appl Environ Microbiol* 61:1110–1115.

2.5. REACTIVITE DES AGENTS CHIMIQUES TOXIQUES DE GUERRE

Les agents chimiques agressifs (toxiques de guerre) ont au même titre que les explosifs chargés les projectiles de la Première Guerre mondiale. Il existe peu d'information concernant le comportement environnemental de ces agents chimiques de guerre. L'essentiel des études sur ces composés porte sur l'*Ypérite* (sulfure d'éthyle dichloré) et les composés organoarséniés au contact de l'eau et leur potentialité de générer des impacts sur les eaux, le biote et/ou les sédiments. On peut se référer à Munro et al., (1999)[383] qui constitue une rare référence en ce domaine. Ces études ont été motivées dès 1990 par l'évaluation environnementale des sites d'ennoyage de munitions chimiques. Par définition, ces agents agressifs sont extrêmement réactifs et réagissent instantanément au contact de l'eau (comme celle formant les muqueuses du corps humain) et ne sont donc pas persistants mais génèrent des sous produits issus de ces réactions. L'essentiel des composés est soluble dans l'eau et s'hydrolyse et/ou s'oxyde en sous-produits possédant une solubilité plus élevée que celle des molécules mères.

Au contact de l'eau l'*Ypérite* par exemple se décomposé par hydrolyse en thiodiglycol (TDG)[384], qui lui-même s'oxyde en thiodiglycol sulfoxyde (TDG(ox)) ; le composé sulfuré se dégrade par ailleurs, mais restant minoritaires devant TDG et TDG (ox).

Les <u>composés arséniés</u> s'hydrolysent en formant des sous-produits similaires quelle que soit la molécule initiale ; par exemple, le *Clark I* (DA) et le *Clark II* (DC) se dégradent en acide diphénylarsineux (As^{3+})(DPA) qui réagit aisément en s'oxydant en oxyde (bis)diphénylarsenique[385]. Dans les conditions naturelles, l'oxydation (abiotique, hydrolyse) a tendance à produire essentiellement de l'acide diphénylarsinique (As^{5+}) (ADPA(ox) ou DPAA) mais aussi l'acide phénylarsonique (PAA), ou l'oxyde de phénylarsine (PAO) (cf. Figure 73). Ces sous-produits réactionnels (molécules filles) sont plus mobiles que les molécules mères initiales. La toxicité des sous-produits d'hydrolyse est au moins équivalente à celle des DA et DC[386]. L'DPAA est le produit de dégradation des composés organo-arséniés par hydrolyse et oxydation le plus couramment détecté sur les sites pollués par les *Clarks*[387]. La transformation biotique anaérobie peut conduire à la production d'arséniates (arsenic inorganique).

Ainsi en présence d'eau ces composés ne persistent pas[388]. Les essais au laboratoire mettent en évidence une dégradation totale des phénylarsines en 30 min en solution aqueuse.

---

[383] Munro, N.B., Talmage, S.S., Griffin, G.D., Waters, L.C., Watson, A.P., King, J.F., Hauschild, V. (1999). *The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products. Environ Health Perspect*. 1999 Dec;107(12):933-74. doi: 10.1289/ehp.99107933. PMID: 10585900; PMCID: PMC1566810.

[384] Munro, N.B., Talmage, S.S., Griffin, G.D., Waters, L.C., Watson, A.P., King, J.F., Hauschild, V. (1999), op. cit.

[385] Haas, R., Schmidt, T., Steinbach, K. et al. (1998). *Chromatographic determination of phenylarsenic compounds. Fresenius J Anal Chem* 361, 313–318 (1998). https://doi.org/10.1007/s002160050892. Hanaoka, S., Nagasawa, E., Nomura, K., Yamazawa, M., & Ishizaki, M. (2005). *Determination of diphenylarsenic compounds related to abandoned chemical warfare agents in environmental samples. Applied organometallic chemistry*, 19(2). 265-275.

[386] Francken, F., Hafez, A.M. (2009). *Case Study in Modeling Dispersion of Yperite and Clark I and II from Munitions at Paardenmarkt. Belgium Marine Technology Society Journal*, Volume 43, Number 4, Fall 2009, pp. 52-61(10). doi: https://doi.org/10.4031/MTSJ.43.4.3A.

[387] Certini, G., Scalenghe, R., and Woods, W.I. (2013). *The impact of warfare on the soil environment. Earth-Science Reviews* 127, 1–15.

[388] Haas, R., Schmidt, T., Steinbach, K. et al. (1998). *Chromatographic determination of phenylarsenic compounds. Fresenius J Anal Chem* 361, 313–318 (1998). https://doi.org/10.1007/s002160050892. Hanaoka, S., Nagasawa, E., Nomura, K., Yamazawa, M., & Ishizaki, M. (2005). *Determination of diphenylarsenic compounds related to abandoned chemical warfare agents in environmental samples. Applied organometallic chemistry*, 19(2). 265-275.

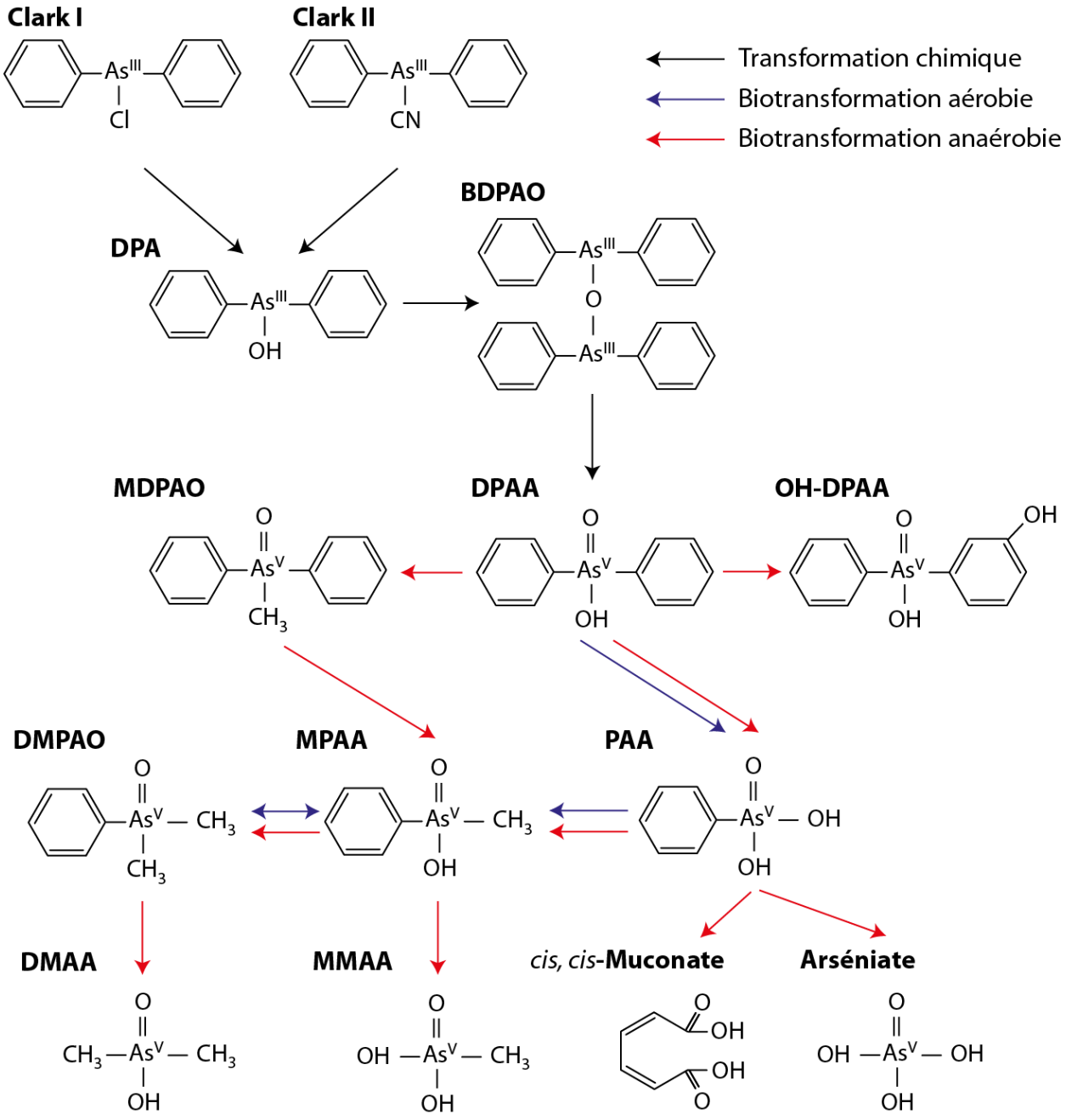


Figure 73 : Voie de dégradation des agents organo-arséniés Clark I et II. Clark I: diphénylchloroarsine ; Clark II: diphénylcyanoarsine; DPA: hydroxyde de diphénylarsine ; BDPAO: Bis-(diphénylarsine) oxyde ; DPAA: acide diphénylarsénique OH-DPAA: Acide diphénylarsénique monohydroxylé ; MDPAO: diphénylméthylarsonique oxyde; PAA: acide phénylarsonique ; MPAA : acide méthylphénylarsénique ; DMPAO: diméthylphénylarsonique oxyde ; MMAA: acide mono-méthylarsénique; DMAA: acide diméthylarsénique[389].

[389] Extrait de Thouin, H (2016). *Transfert de polluants inorganiques dans un technosol de brûlage d'armes organo-arséniées soumis à un apport de matière organique et à des cycles de saturation/désaturation : expérimentation en mésocosme*. Thèse de doctorat soutenue le 15/12/2016. p.47.

Le chloroacétophénone (CN) s'hydrolyse lentement mais contrairement aux composés arséniés, la réaction conduit à des sous-produits non toxiques. Le phosgène ($COCl_2$) se dégrade par hydrolyse très rapidement au contact de l'eau en se décomposant en acide hydrochlorique HCl et en CO_2. Les chlorobenzènes et tétrachlorométhane CCl_4 (adjuvant et solvant des *Ypérites*) et le triphénylarsine (TPA) sont stables dans les eaux et ne sont pas affectés par l'hydrolyse.

3. Sorption et immobilisation

3.1. GENERALITES

La sorption est un terme générique regroupant l'ensemble des mécanismes physico-chimiques (incluant l'absorption, l'adsorption, la désorption et l'échange d'ions, la précipitation) par lesquels un composé est sélectivement retenu par les particules solides minérales ou organiques. La sorption réduit la mobilité des polluants, les vitesses de leur transport en phase aqueuse (se traduisant par un facteur de retard R rendant compte de l'écart entre la vitesse de transport des polluants en phase aqueuse et la vitesse d'écoulement de l'eau). L'immobilisation est un processus par lequel les polluants sont irrémédiablement liés (de façon irréversible) à la matrice solide (exemple de l'humification). Lorsque les composés s'incorporent dans la totalité du volume du solide on parle d'absorption. On parle d'adsorption lorsque les polluants en phase aqueuse ou gazeuse adhèrent à la surface (adsorption) des particules solides (généralement des argiles, des composés humiques, des oxydes et hydroxydes métalliques, des microorganismes, etc.). L'adsorption est un processus réversible répondant à un équilibre entre sorption et désorption.

Les réactions impliquées dans l'adsorption sont multiples : mise en place de liaisons hydrogène, échange ionique, chimisorption (mise en commun d'électrons entre les atomes superficiels du solide et les composés qui sont ainsi activés). Le fractionnement d'un composé en phase aqueuse entre le soluté et les surfaces adsorbantes est fonction de ses propriétés physico-chimiques et des conditions environnementales.

La sorption des composés énergétiques est, compte tenu de la diversité des mécanismes réactionnels en jeu et de leur structure chimique, très fortement site-spécifique. La nature des cortèges de composés intervient par ailleurs dans la sorption par des effets de sorption concurrentielle ou coopérative[390]. Ainsi les coefficients de partage (adsorption / désorption) K_d rendant compte des équilibres sorption / désorption sont généralement déterminés expérimentalement au laboratoire par des essais normalisés batch ou en colonne avec des matériaux des sites étudiés[391]. L'utilisation du K_d suppose que le nombre total de sites d'adsorption soit en large excès par rapport au nombre de moles de l'espèce adsorbable présente dans la phase aqueuse. Le K_d est défini comme suit :

K_d ou K_f ($L.kg^{-1}$) = teneur du composé dans la matrice solide ($mg.kg^{-1}$) / concentration du composé dans l'eau ($mg.L^{-1}$)

Le K_d est fréquemment déterminé pour différentes concentrations des composés en solution à température constante. Les courbes concentration versus K_d sont désignées par isothermes d'adsorption.

[390] Joos, A. (2008). KORA, Themenverbund 5, *op. cit*. p. 30.

[391] OECD 106: *Adsorption - Desorption Using a Batch Equilibrium Method*.

Le K_{oc}, ou coefficient d'adsorption au carbone organique des sols, définit la distribution d'un composé entre les phases solide et liquide d'un sol. Il caractérise la tendance d'un composé à être retenu par la matière organique des sols : plus le K_{oc} est élevé, plus le composé tend à quitter l'eau pour se fixer sur la matière organique qui est présente en proportions variables dans tous les sols. Contrairement au coefficient de partage octanol / eau K_{ow}, qui est intrinsèque au polluant, le K_{oc} dépend du type de matière organique du sol sur lequel le polluant va s'adsorber. Il peut être défini comme suit [392]:

$$K_{oc} \text{ or } K_{foc} = (K_d * 100) / \% \text{ carbone organique.}$$

3.2. ADSORPTION DES COMPOSES NITROAROMATIQUES

Le 2,4,6-trinitrotoluène est adsorbé de façon réversible dans les sols par des mécanismes de liaisons hydrogène et d'échanges ioniques entre les groupements fonctionnels nitro- et les colloïdes du sol[393]. Les NAC se lient à la matière organique (MO) par la mise en place de liaisons covalentes entre la MO et les groupement fonctionnels nitro-. Les gammes de K_d présentées dans la littérature scientifique pour des sols de subsurface oscillent entre 2,3 et 11 $L.kg^{-1}$[394]. Ces K_d sont nettement plus faibles pour des solides alluvionnaires en zone saturée (0,04 à 0,27 $L.kg^{-1}$)[395] du fait d'une fraction moindre en matière organique. La fraction de matière organique (MO) joue un rôle significatif dans la sorption des NAC dans les sols[396], qui diffère s'il s'agit de MO localisée en zone saturée ou en zone non saturée au sein desquelles des conditions physico-chimiques contrastées existent.

Le degré de maturité et de dégradation de la MO influe en effet sur la possibilité d'établir des liaisons covalentes entre NO_2- et la MO. Les isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT) se rencontrent fréquemment dans les eaux souterraines où ils ne sont pas sorbés de façon irréversibles (contrairement aux sols de subsurface riche en MO peu dégradée), même dans des aquifères aux réservoirs riches en éléments solides carbonés[397].

Les NAC peuvent se sorber sur les particules argileuses minérales par la formation de complexes EDA (*Electron Donor-Acceptor*), par interaction entre les groupements nitro- et les cations échangeables incomplètement hydratés[398].

---

[392] OECD 121: *Estimation of the Adsorption Coefficient (K_{oc}) on Soil and on Sewage Sludge using High Performance Liquid Chromatography (HPLC)*.

[393] Pennington, J. C. and Patrick, W. H. Jr. (1990). *Adsorption and desorption of 2,4,6-trinitrotoluene by soils. Journal of Environmental Quality*, vol. 19, no. 3, pp. 559–567, 1990.

[394] *Ibid.*

[395] Pennington, J. C., Gunnison, D., Harrelson, D. W. et al., (1999). *Natural attenuation of explosives in soil and water systems at Department of Defence sites: interim report. Tech. Rep*. EL-99-8, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, USA, 1999.

[396] Yamamoto, H., Morley, M. C., Speitel, G. E. and Clausen, J. (2004). *Fate and transport of high explosives in a sandy soil: adsorption and desorption. Soil and Sediment Contamination*, vol. 13, no. 5, pp. 459–477, 2004.

[397] Thorn, K. A., Pettigrew, P. J., Goldenberg, W. S., & Weber, E. J. (1996,) *Covalent binding of aniline to humic substances. 2. 15N NMR studies of nucleophilic addition reactions. Environmental science & technology*, 30(9). 2764-2775.

[398] Haderlein, S. B., Hofstetter, T. B., & Schwarzenbach, R. P. (2000). *Subsurface chemistry of nitroaromatic compounds. Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives*, 311-356.

La nature, le nombre et la position des groupements fonctionnels (stéréochimie) influencent directement la capacité d'adsorption des NAC[399]. Sheremata et al.[400] déterminent que le K_d augmente lorsque le nombre de groupements amino- augmente.

Le 1,3,5-trinitrobenzène possède, de par la présence de trois groupements fonctionnels électroattracteurs nitro- et leur disposition symétrique, le plus fort déficit d'électrons dans son cycle benzénique qui lui confère une forte affinité pour les charges négatives des argiles. Ce composé est ainsi fortement sorbé sur les matrices argileuses. Il a également été démontré que les capacités d'adsorption diffèrent parmi les isomères d'un même composé. La présence de groupements nitro- en position ortho- réduit l'adsorption**.** Ainsi le 2-amino-4,6-dinitrotoluène se sorbe plus fortement que le 4-amino-2,6-dinitrotoluène. Le 2-mononitrotoluène se sorbe plus faiblement que le 4-mononitrotoluène, le 4-mononitrotoluène et le 2,6-dinitrotoluène (possédant deux radicaux ortho-) plus faiblement que le 2,4-dinitrotoluène (ne possédant qu'un radical en position ortho-)[401].

Généralement les deux mécanismes (sorption sur les fractions organiques et sur les fractions argileuses) sont combinés dans le phénomène d'adsorption. Dans le graphique de la Figure 74, extrait de KORA (2008) les valeurs de K_d pour différents composés énergétiques sont représentées en fonction du TOC (*Total Organic Carbon*). On constate que dans la zone saturée, les valeurs de K_d augmentent significativement lorsque le TOC augmente. La sorption sur les seules matrices argileuses donne des valeurs de K_d plus faibles. Si on compare les composés entre eux, les spécificités et affinités de chaque composé pour la sorption sur les matrices argileuses et les matrices organiques sont discriminantes (et notamment les affinités à former des complexes EDA). Ces singularités s'effacent lors le TOC augmente.

Les mécanismes de sorption, de diffusion et de transformation biotiques et abiotique sont complexes car dépendent de nombreux paramètres mais sont aussi interdépendants. La sorption réduit par exemple la biodisponibilité des composés pour les microorganismes, limitant par-là les potentialités de biotransformation, tout comme la transformation modifie l'aptitude des composés à se sorber.

---

[399] Kalderis, D., Juhasz, A. L., Boopathy, R., and Comfort, S. (2011). *Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report). Pure and Applied Chemistry*, vol. 83, no. 7, pp. 1407–1484, 2011.

[400] Sheremata, T. W., Thiboutot, S., Ampleman, G., Paquet, L., Halasz, A., and Hawari, J. (1999). *Fate of 2,4,6-trinitrotoluene and its metabolites in natural and model soil systems. Environmental Science and Technology*, vol. 33, no. 22, pp. 4002–4008, 1999.

[401] Joos, A. (2008). KORA, Themenverbund 5, *op. cit*. p. 32.

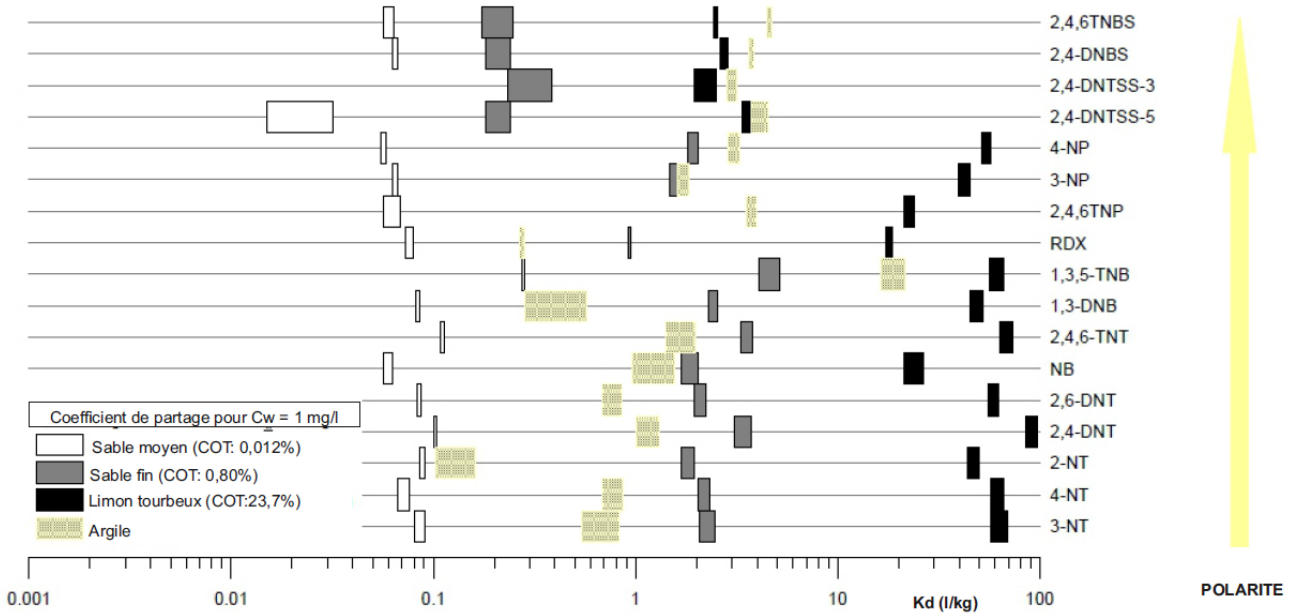


Figure 74 : Coefficient de partage K_d en fonction de différents types de matrices (zone saturée) du site de Torgau-Elsig, Allemagne[402].

3.3. ADSORPTION DES CONSTITUANTS DES ERGOLS SOLIDES NITROCELLULOSIQUES

La nitrocellulose, fibreuse, n'est pas mobile dans l'environnement car insoluble. Il existe très peu de données concernant le coefficient K_d pour la diphénylamine et ses sous-produits de transformation. Les données les plus exhaustives concernent le K_{ow} (compris entre 3,5 et 3,62). qui suggère un comportement hydrophobe de la DPA, n-nitrosodiphénylamine, 2- et 4-nitrodiphénylamine, et 2,4-dinitrodiphénylamine[403]. La nitroglycérine possède des valeurs de log K_{ow} basses (comprises entre 1,62 et 2,81) ce qui lui confère un comportement hydrophile et des log K_{oc} également bas (compris entre 1,6 et 2,77) indiquant une faible propension à la sorption[404]. Ainsi, la nitroglycérine est considérée comme mobile dans les sols et dans les eaux. La nitroguanidine (NIGU) est une nitramine utilisée comme oxydant dans les ergols solides triple base et réduit aussi l'effet flash et la température lors de la déflagration[405]. La NIGU est mobile dans l'environnement, avec une solubilité élevée (3 600 mg.L^{-1} à 20°C[406]) et des valeurs de K_d basses (K_d <0,1[407]).

[402] D'après Joos, A. (2008). KORA, Themenverbund, *op. cit*. p.33.

[403] Mirecki, J., E.; Porter, B., Weiss, Jr., Charles A. (2006). *Environmental Transport and Fate Process Descriptors for Propellant Compounds.* U.S. Army Corps of Engineers. ERDC/EL TR-06-7. 2006 Jun 01. Drzyzga, O., Blotevogel, K.H. (1997). *Microbial degradation of diphenylamine under anoxic conditions. Curr Microbiol* 35(6):343–347.

[404] *Ibid.*

[405] U.S. Army Armement Research and Development Command (USA-ARDEC). 1983.

[406] Gibbs, T. R., and Popolato, A. (1980). *LASL explosive property data*. 61-68. Berkeley, CA : University of California.

[407] Dave, G., E. Nillson, and Wernersson, A.S. (2000). *Sediment and water phase toxicity and UV-activation of six chemicals used in military explosives. Aquatic Ecosystem Health and Management* 3: 291-299.

3.4. ADSORPTION DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE

Il existe très peu de données relatives à la mobilité des ions perchlorate et chlorate dans le milieu poreux souterrain. Le perchlorate est peu retenu ou sorbé par les éléments minéraux constitutifs des sols et réservoirs aquifères du fait (i) de la charge négative (anion) des ions, (ii) de la faible densité de charges au regard des masses moléculaires et (iii) de leur caractère non complexant avec les métaux. Le rayon ionique élevé de l'ion perchlorate ainsi que sa faible densité de charge limitent en effet l'affinité du perchlorate pour les cations métalliques et rendent l'ion perchlorate très soluble et très mobile dans les sols et les eaux. La sorption de l'ion perchlorate par les sols et sédiments a été très peu étudiée.

L'étude la plus complète a été menée par Urbansky and Brown (2001)[408] qui démontrent la sorption et la désorption du perchlorate dans différents types de sols et pour différentes gammes de concentration. La sorption jouerait un rôle dans le comportement environnement du perchlorate pour des sols caractérisés par leurs Capacités d'Echange Anionique (CEA) élevées. Dans ces sols, l'ion perchlorate se substitue à d'autres anions comme les chlorures, sulfates ou les nitrates.

La sorption du perchlorate a aussi été étudiée en évaluant la mobilité des ions iodure I^- et de l'ion radioactif TcO_4^- (pertechnetate) qui présentent un comportement et un chimisme similaire à l'ion perchlorate. Les informations disponibles dans la littérature scientifique montrent que seuls les sols fortement altérés (riches en oxyhydroxydes fer et d'aluminium et en kaolinites (sol ferralitiques, fersialitiques)) possèdent une CEA susceptible d'adsorber efficacement les iodures et pertechnetates. La CEA augmente lorsque le pH décroit en dessous du point de charge nulle

Routson et al, (1978)[409] ont étudiés la sorption de TcO_4- sur deux sols fortement altérés et montrent que cet ion est faiblement sorbés par les sols. Sisson et al., (1979)[410] ont observés l'absence de sorption de TcO_4^- dans des sols sablo limoneux même dans des conditions acides. Ainsi, dans les environnements naturels, en absence de CEA élevés, la sorption et la rétention du perchlorate dans les sols et sédiments peuvent être considérées comme négligeables. Le perchlorate joue le rôle d'électrolytes indifférents à l'adsorption et ne participe que de façon marginale aux balances électrochimiques dans les eaux (faible densité de charge).

Des travaux de recherche, réalisés dans le cadre de la gestion de la pollution aux perchlorates d'ammonium du *Complexe Basic Management Industrial* (BMI) à Henderson, Nevada (Etats-Unis), ont été menés afin d'évaluer la capacité de rétention de sédiments de rivière (rivière Las Vegas) eu égard aux ions perchlorate[411]. 27 échantillons de sédiments ont été prélevés sur le cours impacté de la rivière pour être caractérisés sur le plan minéralogique, granulométrique et physico-chimique. L'un des principaux résultats est que les ions perchlorate peuvent simplement être extraits avec l'eau et ces concentrations sont indépendantes de la composition minéralogique du sédiment et dépendent entièrement de la concentration en perchlorate de l'eau porale.

---

[408] Urbansky, E., & Brown, S. (2003). *Perchlorate retention and mobility in soils. Journal of Environmental Monitoring* 5(3):455-62 https://doi.org/10.1039/B301125A

[409] Routson, R. C.; Cataldo, D. A. (1978). *Accumulation of 99Tc by Tumbleweed and Cheatgrass Grown on Arid Soils. Health Physics* 34(6): p 685-690, June 1978.

[410] Sisson, D.H., MacLean, S.C., Shultz, R.K., Borg, R.J. (1979). *A preliminary study of the migration of technecium in soil underhydrous conditions*. National Technical Service UCRL 52832, 1979; US Department of commerce.

[411] Batista, Jacimaria R., Amy, Penny S., Chen, Yi-Tung, Papelis, Lambis, Unz, Richard (1998). *Final Report: The Fate and Transport of Perchlorate in a Contaminated Site in the Las Vegas Valley. Part A: Investigation of the Influence of Biological Degradation and Sorption on the Fate of Perchlorate. Part B: Modeling of the Transport of Perchlorate in the Las Vegas Wash*. University of Nevada - Las Vegas.

Des essais en colonnes ont été par ailleurs réalisées afin de déterminer le facteur de retard éventuel induit par les interactions perchlorates / solide. Les essais ont été menés avec des colonnes saturée en eau ; Br^- a été utilisé comme un traceur parfait et conservatif ; le transport des perchlorates a été modélisé au moyen du code CXTFIT. Ces expériences ont montré le transport conservatif du perchlorate avec un facteur de retard proche de 1 (non retardé) de 0.76 à 1.29. L'adjonction de Fe° dans la colonne de sédiment durant les essais n'a pas affecté le transport des perchlorates. ClO_4^- et ClO_3^- sont des oxyanions non complexant qui ne s'absorbent que très modérément sur les particules solides (minérales ou organiques) constitutives des aquifères et sédiments.

4. Résumé et conclusions de la Section 2h

Les poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale sont constitués d'un mélange (formulation) de composés énergétiques organiques et/ou inorganiques associés à des adjuvants (stabilisants, flegmatisants, etc.). Ils se présentent à l'état solide et cristallisé, ou encore à l'état pâteux pour les explosifs (per)chloratés paraffinés, dans les conditions de pression et de température standards.

De très nombreuses études et recherches ont été identifiées dans le cadre de ce travail portant sur le devenir environnemental des composés entrant dans la formulation des poudres et explosifs utilisés durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental. L'essentiel de ces recherches portent sur des pollutions industrielles contemporaines de sites de production de poudres et d'explosifs, et des expériences au laboratoire, en particulier en Amérique du Nord, dans le but de trouver des voies de dépollution de ces sols et/ou eaux souterraines dégradées. Aucune étude publiée n'a été identifiée portant sur des pollutions possiblement plus diffuses, en conditions environnementales, mais aussi localement concentrées, en lien avec des faits de guerre historiques anciens.

L'essentiel des études et recherches porte sur les composés les plus fréquemment rencontrés sur les sites de production de poudres et explosifs à savoir le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT), ses intermédiaires de synthèse (dinitrotoluènes, DNT) et impuretés, la nitroglycérine (NG), les sels à base de perchlorate et des explosifs modernes comme les RDX et HMX. Pour les autres composés, de nombreuses incertitudes concernant leur comportement environnemental subsistent[412].

Réactivité et affinités des NAC pour la matrice. Fractionnement

Les composés énergétiques nitrés sont tous des composés xénobiotiques réactifs du fait du caractère électro attractif des groupements fonctionnels nitro- qui leur confère une forte propension à se transformer dans l'environnement selon de nombreux schémas réactionnels, biotiques ou abiotiques, en conditions aérobies ou anaérobies. La réduction des groupement nitro- (NO_2-) en radicaux amino- (NH_2-), catalysée par des composés inorganiques du milieu ou des microorganismes, est le cheminement réactionnel privilégié. Ces sous-produits de transformation sont généralement persistants et mobiles dans les eaux souterraines et les conditions environnementales habituellement rencontrées, alors qu'en zone non saturée ils peuvent se sorber (selon plusieurs mécanismes) à la matière organique et/ou aux minéraux argileux, soit de façon réversible, soit de façon irréversible (immobilisation par sorption aux composés humiques).

[412] Pennington, J. C., & Brannon, J. M. (2002). *Environmental fate of explosives. Thermochimica acta*, 384 (1-2). 163-172.

L'aptitude des composés à se sorber est dépendante (i) des conditions environnementales (nature et minéralogie des fractions solides, conditions physico-chimiques et microbiologiques) et (ii) des propriétés intrinsèques des substances (nature et position stéréochimique des groupements fonctionnels). Les sols (zone non saturée) riches en matière organique sont donc favorables à la rétention des NAC et à leur transformation sous l'effet de l'activité biologique.

La hiérarchisation des coefficients de distribution K_d généralement admise est la suivante TNT > 2-ADNT > 4-ADNT > 2,6-DANT > 2,4-DANT[413]. Des effets de compétition entre différents NAC et leurs sous-produits de transformation aux faibles concentrations peuvent venir modifier l'ordonnancement des affinités à la sorption. Les mécanismes de sorption et de transformation sont aussi interdépendants.

Enfin, dans les environnements de surface, les NAC, exposés à la lumière, subissent des phototransformations par photolyse générant de nombreux sous-produits persistants et très mobiles, principalement des acides nitrobenzoïques. Les NAC ne sont pas sensibles à l'hydrolyse dans les conditions physico-chimiques (et notamment de pH) habituellement rencontrés dans les environnements naturels.

La singularité des ions chlorate et perchlorate

Les ions chlorate et perchlorate présentent la particularité (i) d'être extrêmement mobiles dans les sols et les eaux souterraines du fait de leurs solubilités très élevées et surtout de leur indifférence à la sorption et (ii) d'être récalcitrants, persistants, dans les conditions habituellement rencontrées dans l'environnement naturel. Ils se comportent donc comme des traceurs parfaits migrant en phase aqueuse dans les sols et les eaux souterraines à la même vitesse que l'eau. Les ions chlorate et perchlorate ne sont ni transformés (transport conservatoire), ni retardés dans leur transport ce qui n'est pas le cas des autres NAC que les (per)chlorates peuvent accompagner.

Les espèces azotées inorganiques

Nitrate et ammonium étaient courants dans les formulations des poudres et explosifs de la Première Guerre mondiale, mais leur transport n'est pas conservatif (durant lequel ils subissent de processus de dénitrification). Par ailleurs l'empreinte de l'azote d'origine pyrotechnique peut interférer et être occultée par celle d'origine agricole.

Une migration « chromatographique » des composés au sein de la zone non saturée

Les substances énergétiques des poudres et explosifs appartiennent à plusieurs familles chimiques, organiques et inorganiques, essentiellement basées sur la chimie de l'azote et en moindre mesure sur celle du chlore. De fait, elles ne forment pas une famille à la composition et à la structure chimique uniforme, ce qui va se traduire dans l'environnement par des contrastes dans leur comportement entre deux extrêmes (i) des composés récalcitrants à la transformation biotique et abiotique, solubles, indifférents aux mécanismes de sorption, et donc très mobiles et persistants et qui connaissent dans les eaux un transport conservatif (cas des ions chlorate et perchlorate au comportement de traceur parfait) et (ii) des composés très réactifs, sensibles aux processus de transformation biotiques et/ou abiotiques, interagissant avec la matrice solide minérale (argiles) et organique par sorption, réduisant leur mobilité et dont le transport dans les eaux est non conservatif (cas du 2,4,6-trinitrotoluène).

[413] Haderlein, S. B., Weissmahr, K. W. and Schwarzenbach, R. P. (1996). *Specific adsorption of nitroaromatic explosives and pesticides to clay minerals. Environmental Science and Technology*, vol. 30, no. 2, pp. 612–622, 1996.

Les constituants des matières énergétiques et leurs sous-produits dérivés, lorsqu'ils sont mis au contact de l'environnement, viennent dégrader l'état naturel des milieux (sols, eaux, etc.) et éventuellement générer des effets néfastes sur la santé, les écosystèmes, la ressource en eau selon leurs propriétés de toxicité. Mais les cortèges et signatures (*Fingerprint)* de composés issus de ces matières et marquant l'environnement ne reflètent plus ceux initialement présents dans les poudres et explosifs du fait de la grande diversité et disparité des comportements environnementaux des composés incriminés. Le transport, *per descensum*, par l'infiltration gravitaire des eaux météoriques infiltrées au sein de la zone non saturée, puis par convection / diffusion au sein des eaux souterraines en zone saturée est conservatif pour les uns (ions perchlorate et chlorate), réactif pour les autres (composés nitrés), retardé ou non par rapport aux écoulements de l'eau. Dans ce transport**,** le milieu naturel joue telle une colonne chromatographique séparative sur le comportement différentiel des composés. Les cortèges de composés diffèrent vraisemblablement en fonction de la profondeur au sein de la zone non saturée.

La zone non saturée, du fait de la présence de matière organique réactive et d'une intense activité microbiologique, est le milieu où œuvrent les mécanismes de transformation et de sorption qui affectent les signatures chimiques des cortèges de composés.

On retrouve ainsi en zone saturé, dans la nappe, au droit de sols pollués par les composés énergétiques, les composés initiaux les plus solubles, récalcitrants aux transformations, peu ou pas sorbés et les sous-produits de dégradation les plus mobiles et les moins facilement incorporés à la matière organique (chlorate, perchlorate, ADNT, DANT, MNT, DNT et composés polaires).

Les signatures chimiques différentielles entre la pollution des sols et le marquage des eaux souterraines au droit de ses sols sont connues et documentées sur les sites pollués historiques de production du TNT comme par exemple Stadtallendorf en Allemagne (cf. Figure 75 page suivante).

L'autre conclusion de ce travail est de mettre en évidence la grande réactivité biotique et abiotique des composés énergétiques se traduisant par la production d'une vaste gamme de composés, pour la grande majorité, persistants une fois dans les eaux souterraines.

La caractérisation de l'impact de la production, du stockage, de l'usage et de la destruction de poudres, explosifs et autres matériels explosibles de la Première Guerre mondiale ne saurait se limiter aux seuls composés connus dans les archives comme entrant dans la formulation officielle des matières énergétiques. Il convient de compléter cette liste de composés par les sous-produits de transformation environnementale biotique et abiotique, et des éventuels impuretés présentes dans ces matières d'origine industrielle.

Le TNT est sans conteste le composé énergétique le plus produit et utilisé durant la Première Guerre mondiale par toutes les parties belligérantes (cf. Section 1h). La caractérisation de l'impact environnemental de la Grande Guerre est indissociable de celui de l'usage du TNT. Elle repose sur la recherche du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) mais aussi sur ses sous-produits de transformation biotique et abiotique compte tenu de la réactivité environnementale de la molécule de TNT : isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT) et de la diamino-nitrotoluène (DANT).

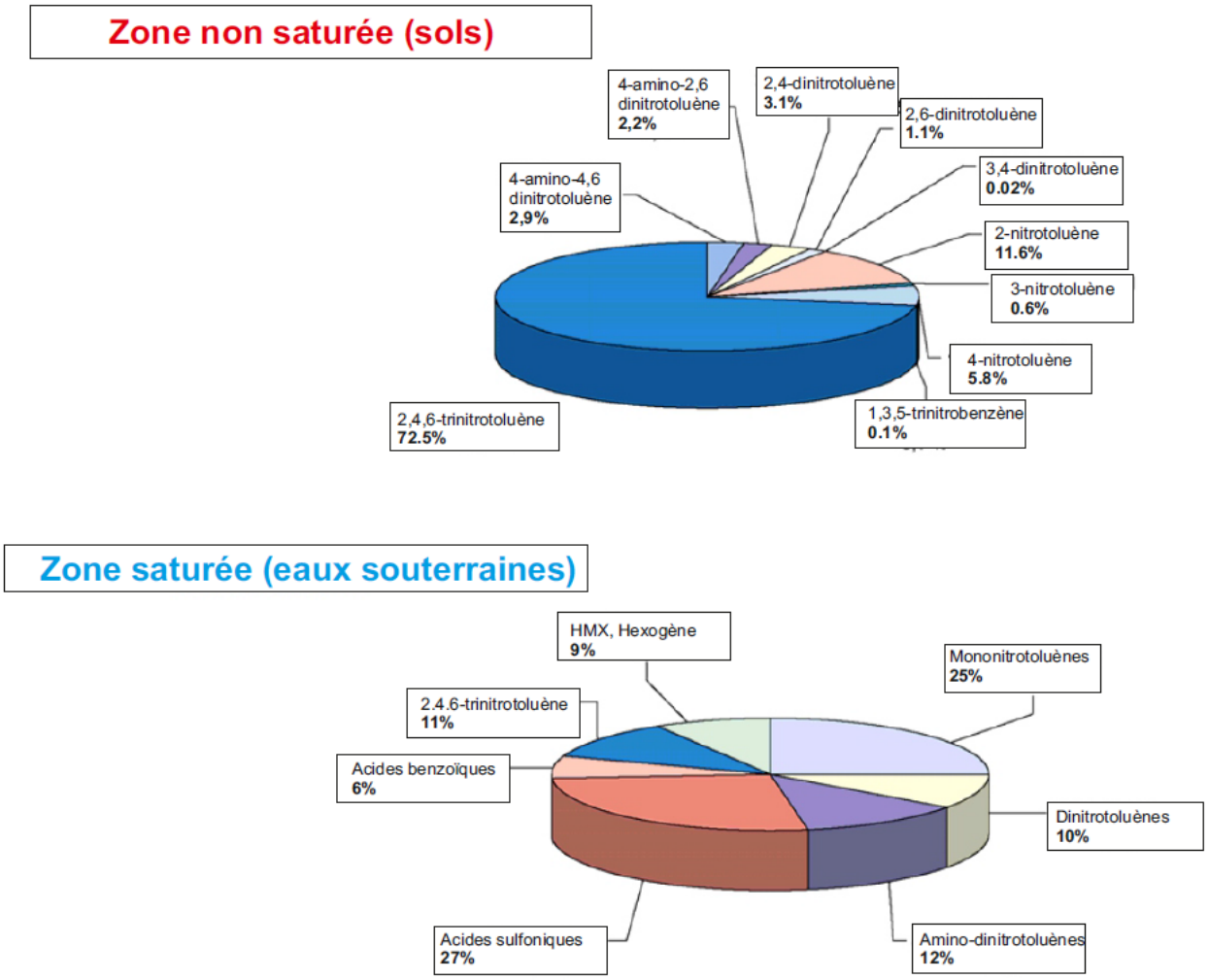


Figure 75 : Signatures chimiques des sols et des eaux souterraines au droit de l'ancien site de production de TNT à Stadtallendorf (Allemagne)[414].

Quant aux agents toxiques de guerre, leurs adjuvants et leurs sous-produits réactionnels, ils restent, vus d'une part la réactivité de ces composés et d'autre part les tonnages mis en œuvre, d'un intérêt secondaire par rapport aux matières explosibles en ce qui concerne leur potentiel de dégradation de l'environnement sur le long terme.

Ce travail de recherche a permis d'identifier clairement sur la base de fonds d'archives les composés et substances entrant dans la composition des poudres et explosifs largement utilisés durant la Grande Guerre par toutes les parties belligérantes engagées militairement sur le front occidental, puis d'ouvrir des voies de recherche vers une connaissance des compositions qui échappent à l'enregistrement archivistique. Enfin, la connaissance de l'impact des composés d'origine pyrotechnique sur la qualité des sols et/ou des eaux sur le long terme ne saurait se restreindre à celle des composés entrant dans les formulations des poudres, explosifs et autres matières agressives. Ces composés se transforment, sous l'effet de nombreux processus réactionnels, au contact de conditions environnementales. La liste des composés à rechercher dans ces milieux sous influence d'activités historiques potentiellement polluantes doit donc comprendre à minima les principaux constituants primaires mais aussi d'une part leurs sous-produits de transformation environnementale et d'autres part les composés présents en impuretés (comme des intermédiaires de production).

[414] D'après Joos, A. (2008). KORA, Themenverbund 5, *op. cit.*

La grille du Tableau 14 suivant (sous-produits et impuretés), complète judicieuse celle du Tableau 9 (composés primaires). L'identification des impuretés se base sur la littérature scientifique exposée dans ce qui précède et les résultats de travaux de recherche européens KORA (2008)[415].

Composé	Explosifs					Toxiques de guerre		Observation
	Abréviation	Intermédiaire de production	Sous-produit de synthèse	Sous produit de transformation environnementale biotique	Sous produit de transformation environnementale abiotique	Sous-produit de synthèse	Sous produit de transformation abiotique	
2-nitrotoluène	2-NT	■						-
3-nitrotoluène	3-NT		■					-
4-nitrotoluène	4-NT	■						-
2,4-dinitrotoluène	2,4-DNT	■						-
2,6-dinitrotoluène	2,6-DNT	■						-
2,3-dinitrotoluène	2,3-DNT		■					-
3,4-dinitrotoluène	3,4-DNT		■					-
Nitrobenzène	NB		■					-
Acide 2,4,6-trinitrobenzoïque	ATNB		■		■			-
1,3,5-trinitrobenzène	TNB		■		■			-
4-amino-2,6-dinitrotoluène	4-ADNT			■				-
2-amino-4,6-dinitrotoluène	2-ADNT			■				-
2-amino-4-nitrotoluène	2-A-4-NT			■				-
4-amino-2-nitrotoluène	4-A-2-NT			■				-
2-amino-6-nitrotoluène	2-A-6-NT			■				-
2-methylaniline	2-MA			■				-
3-methylaniline	3-MA			■				-
4-methylaniline	4-MA			■				-
Acide 2-amino-4,6-dinitrobenzoïque	A-2-A-DNB				■			-
Acide 4-amino-2,6-dinitrobenzoïque	A-4-A-DNB				■			-
Acide 2,4-dinitrobenzoïque	A-2,4-DNB				■			-
Acide diphénylarsinique	ADPA						■	Dérivant des diphénylarsines
Thiodiglycol	TDG						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
1,4-dithiane	-					■		Présent dans l'Ypérite au soufre
1,2,5-trithiépane	-					■		Présent dans l'Ypérite au soufre
1,4-oxathiane	-					■		Présent dans l'Ypérite au soufre
1-oxa-4,5-dithiépane	-					■		Présent dans l'Ypérite au soufre
Bis(2-hydroxyethyl) sulfure	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
Bis(2-hydroxyethyl) sulfone	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
Acide 2,2´-Thiodiacetique	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
Bis(2-chloroethyl) sulfure	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
Bis(2-chloroethyl) sulfone	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre
Bis(2-chloroethyl) sulfoxyde	-						■	Dérivant de l'Ypérite au soufre

Tableau 14 : Impuretés et sous-produits de transformation environnementale des composés constituant les poudres, explosifs et matières agressives.

Il reste à présent à nous plonger dans l'histoire de la Grande Guerre pour expliciter où, quand, pourquoi, comment et à quelle hauteur ces quantités considérables de matériels, constitués de composés chimiques potentiellement polluants pour l'environnement, furent mis en œuvre durant la Première Guerre mondiale à des échelles jusqu'alors encore jamais vues.

[415] Joos, A. (2008). KORA, Themenverbund 5, *op. cit*. p.21.

Section 3h
La Grande Guerre de l'Artillerie. L'arme gagneuse de bataille

1. Introduction de la Section 3h

Pour comprendre l'importance inédite prise par l'Artillerie, les poudres, les explosifs et les toxiques de guerre durant la Grande Guerre pour la conduite des opérations militaires, je propose dans un premier temps d'exposer les mutations technologiques profondes que connut l'Artillerie durant la seconde moitié du XXe siècle, puis dans un second temps de relater les principales phases de la Première Guerre mondiale sur le front occidental pour ensuite, dans un troisième temps, démontrer, dans ce contexte historique, chiffres à la clé, l'évolution quantitative et qualitative des usages des moyens de l'Artillerie, des poudres, explosifs durant le conflit. Ce processus de mutation et d'affirmation de l'Artillerie comme arme majeure dans une guerre, long de près de 70 ans, mais accéléré par les circonstances de la Grande Guerre, est nécessaire pour interroger, pour expliciter puis mettre en lumière toutes les spécificités et les singularités d'une guerre inédite en terme de violence des armes. Ce processus entraîna dans son sillage de nouvelles problématiques nées au cœur de la guerre, pour la guerre et amplifiées une fois les hostilités arrêtées.

2. L'Artillerie. De l'ombre à la lumière. 1850-1914

2.1. UNE ARME EN PEINE D'INNOVATIONS

Rien n'avait réellement changé pour l'Artillerie depuis le XVe siècle à la première moitié du XIXe siècle. Les canons et mortiers en fonte, bronze – parfois joliment ornés - se chargeaient avec des boulets pleins, des bombes ou des obus rudimentaires par la bouche à feu. Il s'agissait en résumé de lourds cylindres de métal dotés d'une âme lisse. Les projectiles étaient pleins (boulets) ou creux et chargés de Poudre noire qui officiait aussi par ailleurs comme charge de propulsion. Les calibres étaient uniformes au sein de chaque pays mais différaient d'un pays à l'autre. Imprécis, leur pouvoir de destruction et leur portée étaient limités. L'Artillerie était encore reléguée comme une arme d'accompagnement de l'Infanterie dans des guerres basées sur le mouvement (modalités de combat pour lesquelles les petits calibres étaient privilégiés) ou comme une arme de siège pour la prise de places fortes (pour les canons de plus gros calibre).

Les solutions technologiques pour augmenter la portée et la précision des canons étaient connues, par le remplacement du chargement par la bouche par celui par la culasse, par le remplacement des âmes lisses par des âmes rayées. Les âmes à rayures hélicoïdales imprimaient au projectile, passant dans le fût du canon au moment du coup de départ, un mouvement axial gyroscopique, stabilisant le vol et rendant le tir très précis. Pour l'une comme pour l'autre, ces solutions se heurtaient encore à des difficultés techniques, à des réticences de certains officiers artilleurs conservateurs et à des coûts de production prohibitifs.

Une séries d'inventions ont permis aux ingénieurs de l'armement de franchir ces seuils technologiques provoquant, dans le sillage de la Seconde Révolution industrielle et ses progrès significatifs dans le domaine de la chimie, l'électricité, de la chimie de synthèse et aussi de la métallurgie, une mutation profonde de l'Artillerie.

Cette révolution survint entre les années 1850 et 1875 notamment sous l'impulsion de l'Allemagne qui fit la démonstration éclatante, dans les conflits dans lesquels elle était engagée, de l'intérêt militaire à développer une Artillerie moderne, puissance, précise et fiable.

2.2. LA SECONDE REVOLUTION INDUSTRIELLE. L'ESSOR DE LA CHIMIE DE SYNTHESE. LORSQUE L'APPRENTI SORCIER S'EN VA EN GUERRE

Durant cette Seconde révolution industrielle, le génie chimique transféra des expériences réalisées à l'échelle du laboratoire à celle de la production industrielle. Le chimiste allemand Julius Wilbrand découvrit en 1863 le TNT qui fut ensuite produit de façon industrielle dès 1891. L'Allemagne industrialisa sa production et en devint le premier producteur mondial dès la fin du XIXe siècle. En France, Eugène Turpin synthétisa l'acide picrique et mit en évidence ses propriétés explosives. Ce nouvel explosif breveté en 1885, fut adopté par le gouvernement français en 1887 comme « explosif réglementaire » sous le nom de *Mélinite*, et remplaça, dans les projectiles, la poudre noire, trop instable et peu puissante.

Le chimiste français Eugène Turpin avec son « obus torpille », l'ancêtre des obus modernes[416].

L'image laudative d'Eugène Turpin et diffusée sur un format carte postale. Ce chimiste découvrit les propriétés explosives de l'acide picrique (Mélinite). qu'il parvint à stabiliser par pressage dans du coton[417].

Figure 76 : Eugène Turpin, la mélinite et l'obus-torpille.

Alfred Nobel découvrit accidentellement comment stabiliser la nitroglycérine sous forme de dynamite. En 1867, 11 tonnes de nitroglycérine furent dénombrées sur terre, pour 70 000 tonnes en 1897[418].

La nitrocellulose fut quant à elle découverte en 1838 par Théophile-Jules Pelouze sous la forme de papier nitré mais l'histoire des poudres propulsives nitrocellulosiques (ergols solides) ne débuta vraiment qu'avec le chimiste allemand Christian Friedrich Schönbein en 1846. En 1884, le chimiste et pyrotechnicien Paul Vieille inventa au Laboratoire Central des Poudres et Salpêtres à Paris la « Poudre sans fumée » à base de nitrocellulose.

---

[416] Bibliothèque nationale de France. Cette curieuse dénomination fut adoptée vers 1866-1887 pour désigner les premiers obus appelés à éclater sous l'action d'un explosif brisant, car la puissance des nouveaux projectiles leur avait valu d'être comparés à celle des premières torpilles dont la marine française avait entamé la fabrication en 1876. Le projectile fut mis au point vers 1881.

[417] Eugène Turpin (1848 - 1927). L'inventeur de la *Mélinite.* https://eugeneturpin.blogspot.com/2007/08/linventeur-de-la-mlinite.html

[418] Jeanneney, J.N. (2013). *La Grande Guerre si loin, si proche. Réflexions sur un centenaire*. Le Seuil. p.25.

Ainsi donc, les importants progrès de la chimie de synthèse à la fin du XIXe siècle donnèrent naissance à de nouveaux explosifs révolutionnaires car très puissants (dit « brisants ») présentant par ailleurs une grande stabilité qui leur permettait de résister, sans détoner, au choc du coup de départ, une propriété singulière pour des matières énergétiques par définition métastables.

Cette stabilité des explosifs autorisait dès lors leur chargement dans des projectiles propulsés à vitesse élevée. Les boulets pleins, ainsi que les premiers obus chargés de Poudre noire déflagrante, furent abandonnés au détriment des « obus-torpille » détonant, oblongs et profilés, propulsés par des charges encartouchées serties aux projectiles ou amovibles (sacs ou « gargousses »). Ces tirs, grâce à l'usage d'ergols solides puissants nitrocellulosiques (déflagrant en produisant instantanément de gros volumes gazeux), homogènes d'un lot à l'autre, pouvait être répétés sur une cible éloignée avec une grande précision.

L'Artillerie était alors en mesure de révolutionner ses moyens technologiques, canons et projectiles. L'Artillerie de l'Allemagne en guerre durant la seconde moitié du XIXe siècle fit une éclatante démonstration de l'intérêt militaire de l'usage des nouvelles technologiques de la balistique.

2.3. LA DEMONSTRATION ECRASANTE DE LA PUISSANCE D'UNE ARTILLERIE ALLEMANDE AGUERRIE

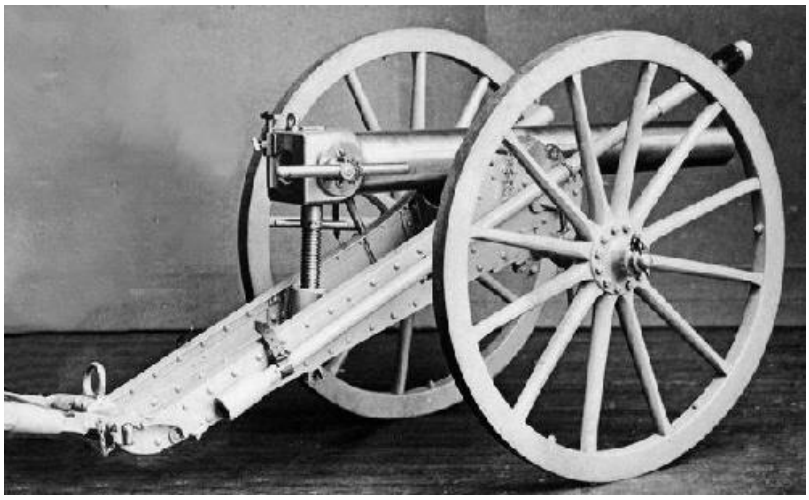
L'Allemagne s'était dotée dès la seconde moitié du XIXe siècle d'une artillerie moderne, puissante, forte de son industrie métallurgique et d'une tradition militaire octroyant à l'Artillerie dans les tactiques de combat le statut d'arme d'accompagnement de l'infanterie, selon la doctrine militaire, théorisée avant-guerre par Carl Von Clausewitz[419] « *L'Artillerie est la plus haute expression du principe destructeur et son mode d'action dans le combat se combine le mieux à celui de l'infanterie […]* [420]». Le père de la modernité et de l'excellence de l'artillerie allemande était sans aucun doute Alfred Krupp (1812-1887) surnommé « le Roi des canons » (cf. Figure 77) en lien avec sa passion et son engagement industriel pour ce qui avait trait à l'Artillerie. Il sut faire l'amalgame vertueux entre le génie industriel et les avancées scientifiques et inventions en développant des canons sur lesquels se basèrent les futures artilleries modernes. Dès les années 1850, Krupp était convaincu que l'acier, en lieu et place du bronze et de la fonte, les âmes rayées et le chargement par des culasses mobiles étaient l'avenir de l'Artillerie. Les progrès dans le domaine de la métallurgie amenèrent ingénieurs et artilleurs à développer et construire des canons d'un genre nouveau, faits d'aciers spéciaux et innovants capables d'encaisser d'énormes pressions. Lorsque Guillaume Ier (1797-1888) accéda en janvier 1861 au trône du royaume de Prusse, d'importantes commandes furent passées vers Krupp qui transforma un parc d'artillerie assez traditionnel en parc le plus moderne au monde.

Les campagnes militaires victorieuse de la Prusse contre le Danemark en 1864 (la guerre des Duchés, encore désignée par seconde guerre prusso-danoise ou seconde guerre de Schleswig, soldée par la victoire de Dybbøl, en juin 1864) puis contre l'Autriche en 1866 (soldée par la bataille de Sadowa ou bataille de Königgrätz le 3 juillet 1866) furent des opportunités de tester et mettre à l'épreuve sur le terrain ces nouveaux matériels. Les enseignements tirés par cette épreuve du feu permirent d'améliorer encore ces canons.

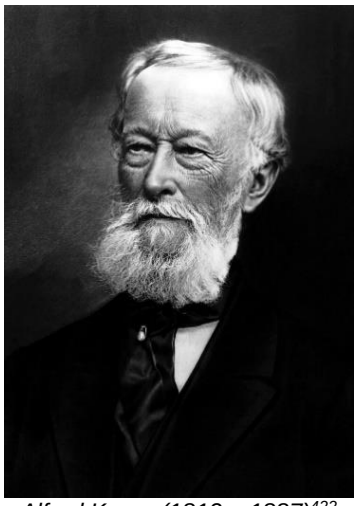
---

[419] Officier général et théoricien militaire prussien, Carl Philipp Gottlieb von Clausewitz (1780-1831) a été un écrivain prolifique et un stratège, il est l'auteur en particulier d'un traité majeur de stratégie militaire intitulé De la guerre.

[420] Bibliothèque nationale de France. Rapporté par le Capitaine Culmann. *Chose d'Allemagne*, Paris, Lavauzelle, probablement 1910. p. 115.



Canon Krupp de 4 prussien C/1864[421]



Alfred Krupp (1812 – 1887)[422]

Figure 77 : Alfred Krupp et canon prussien de 4 avec chargement à la culasse.

Ni la France, ni l'Angleterre n'étaient engagées à cette époque contre d'autres armées européennes tant et si bien que le besoin d'investir dans de nouvelles technologies militaires et une Artillerie moderne ne s'était pas fait ressentir[423]. Pour ces deux pays l'Artillerie resta rudimentaire avec encore une large proportion de pièces à âmes lisses et, du fait de pressions imposées par le conservatisme de certains artilleurs, avec un chargement par la bouche.

L'écart entre les artilleries françaises et allemandes pesa lourdement dans la guerre franco-prussienne déclarée par la France en juillet 1870. L'artillerie allemande fit avec la guerre franco-prussienne, l'éclatante démonstration, du rôle dorénavant capital et décisif que cette arme jouait et allait jouer sur le champ de bataille et de sa supériorité par rapport à celle de son adversaire français. Dès septembre 1870, un correspondant du *Times* de Londres fut dépêché à Sedan où il assista à la déroute de l'armée française et à la capitulation de la ville. Son diagnostic de la situation convergeait avec celle du Prince prussien de Hohenlohe selon lequel l'artillerie prussienne était bien supérieure, en matériels comme en compétences des servants, à celle des Français. Le chargement des pièces par la culasse fit la différence. Les cadences étaient plus rapides, les tirs plus précis et de plus longue portée. La légende veut que Napoléon III dise au roi de Prusse lors de leur rencontre que « *C'est votre Artillerie, Sire, qui a gagné la campagne*[424] ». La guerre se technicisa avec l'application de nouvelles technologies au domaine de l'artillerie avec en corollaire l'avènement d'une artillerie moderne.

[421] La guerre de 1870-71 en images. https://www.laguerrede1870enimages.fr/page284.html

[422] Alfred Krupp († 1887). http://www.thyssenkrupp-competition.com/en/presse/bilder.html&photo_id=16

[423] L'armée française du Second Empire était engagée militairement en Crimée (guerre de Crimée du 04 octobre 1853 au 30 mars 1856) et en Italie (Campagne d'Italie du 26 avril au 12 juillet 1859) et dans des expéditions au Mexique, en Corée et en Cochinchine.

[424] Chartrand, R. (2019). « *La révolution technologique de l'artillerie », Traditions. Guerriers et militaires de l'époque moderne*, n°24, février 2019. p. 84.

Les nouvelles technologies de l'Artillerie eurent un impact considérable sur l'art et la manière de conduire une guerre et bouleversèrent profondément la vision internationale de cette arme et la stratégie militaire des nations[425]. « *Lors de la décennie 1860, des mutations techniques ont commencé de transformer de fond en comble les conditions même du combat au sein du monde occidental* [426]». Suite à sa défaite de 1870, l'évidence s'imposa à l'armée française de réarmer totalement l'Artillerie, dont le parc était hétéroclite et déclassé[427], en optant pour des pièces en acier à chargement par la culasse et à âme rayée. Plusieurs systèmes de canons furent alors proposés, comme le système De Bange en 1877.

Ce n'est que 20 ans plus tard que fut développé le canon de campagne emblématique de l'artillerie française durant la Grande Guerre : le canon de 75 m « modèle 1897 », une pièce qui cristallisa sur elles toutes ces innovations dont le frein de recul oléopneumatique qui permettait d'enchainer les tirs sans avoir à repointer et repositionner le canon. Maniable, mobile, alliant une cadence de tir exceptionnelle à une précision infaillible, le canon de campagne de 75 mm devint la pièce maîtresse de l'artillerie française. D'une portée d'environ 10 km, cette pièce pouvait potentiellement tirer une vingtaine d'obus à la minute. Le tir en salve constituait le principal atout de ce type de canon léger. Cette arme remarquable resta en service dans l'armée française jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. « *L'ère des fondateurs* » séparant les deux guerres stimula les innovations en matière d'artillerie.

Canon rayé d'un obusier allemand. Hubé, D. (2016).

Canon de campagne de 75 mm français. Hubé, D. (2016).

Figure 78 : Exemples de pièces d'artillerie de campagne de la Première Guerre mondiale (mémorial de Verdun).

2.4. UNE ARTILLERIE FRANÇAISE DANS L'OMBRE DE L'INFANTERIE

Allemands comme Français avaient élaboré au tout début du XXe siècle des plans offensifs en prévision d'une possible guerre dans un contexte de plus en plus tendu sur le plan international entre les grandes puissances en Europe. L'une comme l'autre était persuadée que leur plan offensif respectif, avec côté allemand le plan Schlieffen et côté français le Plan XVII, misant sur une guerre courte, ne pouvait que se solder par une victoire éclatante et écrasante en quelques semaines.

[425] Chartrand, R. (2019), *op. cit.*

[426] Audoin-Rouzeau, S. (2008). *Combattre. Une anthropologie Historique de la guerre moderne (XIXe-XXIe siècle).* Les livres du nouveau monde. Editions du Seuil, mars 2008. p. 198.

[427] Chartrand, R. (2019), *op. cit.*

Les choix stratégiques et tactiques flattaient le « *culte de l'offensive*[428] » cultivé au sein des cercles militaires, de part et d'autre du Rhin, depuis 1870. S'il s'agissait là d'une philosophie de conduite de la guerre commune et partagée entre les deux parties, des différences d'approches stratégiques vinrent toutefois nuancer ce rapprochement. L'armée française suivait le mot d'ordre énoncé par le Général Ferdinand Foch. « *Attaquer partout et voir après* », attaquer droit devant « *à la gorge*[429] » sans plan de campagne car pour les stratèges « *Un plan de guerre préparait la bataille, il ne la conduisait pas* [430]».

Pour les Allemands, si selon A. Schlieffen « *L'attaque était la meilleure des défenses*[431] » la stratégie était aussi clairement offensive mais organisée en recherchant la réussite de l'attaque par des manœuvres rapides d'encerclement des forces adverses pour les neutraliser. Pour les décideurs, au sein de l'armée française, l'Artillerie n'était qu'une arme de soutien à l'infanterie « *Beaucoup d'entre eux pensait que le rôle de l'artillerie serait secondaire dans une guerre de mouvements, où la manœuvre, l'action de l'infanterie et la baïonnette joueraient le rôle premier*[432] ».

L'enseignement militaire et la formation des officiers insistaient sur la prévalence du mouvement au combat, où la manœuvre, l'action de l'infanterie et la baïonnette primaient[433]. Dans ce contexte l'Artillerie fut placée au second plan des investissements militaires et en particulier l'artillerie lourde, qui faute d'être modernisée resta obsolète. Cette arme ne fut pas développée car jugée impropre voire nuisible à la guerre de mouvement. Le canon de 105 mm de campagne était déjà considéré comme trop lourd pour la manœuvre.

Jusqu'en 1912, les directeurs de l'Artillerie étaient des officiers d'Etat-Major qui connaissaient fort peu les matériels, qui n'avaient « *ni idée arrêtée, ni idée préconçue*[434] » sur les améliorations à apporter aux matériels et tactiques de l'Artillerie. Ainsi, les innovations de l'Artillerie connues des artilleurs et industriels, n'eurent jamais d'échos en France au sein des armées. Les crédits destinés à cette arme « *ne figuraient plus au projet du budget qu'amoindris dans une forte proportion*[435] ». Ils ne furent votés en France qu'à la veille de la Première Guerre mondiale.

La responsabilité de l'adoption de nouveaux matériels fut transférée en 1912 à l'Inspection des études et expérimentations qui, au lieux d'apporter de substantielles et rapides modifications aux armements déjà existants, se mit à l'étude de nouveaux matériels en faisant largement appel pour cela à l'industrie privée.

---

[428] Van Evera, S. (1984). « *The Cult of the Offensive and the Origin of the First World War* », *Internatonal Security,* été 1984, Vol IX, n°1, pp 58 - 107.

[429] Colonel De Grandmaison (1911), cité dans Emile Wanty (1962). *La pensée militaire*, Bruxelles, Brespols, p. 326.

[430] *Ibid,* p. 449.

[431] Ritter, G. (1958). *The Schlieffen Plan : Critic of a Myth,* Londres, Oswald Wolff, 1958, p.100.

[432] Bibliothèque nationale de France. Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions*. Novembre 1914 – mai 1915. Paris. Henri Charles – Lavauzelle. Editeur militaire. 1921. p. 28.

[433] Bibliothèque nationale de France. *Cours d'infanterie de l'Ecole supérieure de guerre (1913).*

[434] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie*, *op. cit*. p. 34.

[435] *Ibid*. p. 27.

Ces matériels, alliant la puissance et la mobilité furent bien développés et des commandes passées mais « *outre que c'était peu, c'était malheureusement trop tard* [436]». Les délais de livraison à l'armée s'échelonnaient entre août 1914 et décembre 1917.

2.5. UNE REPONSE HUMANISTE A LA MILITARISATION INHUMAINE : LES BONNES INTENTIONS DE LA HAYE

> *« La guerre est un acte de violence et il n'y a pas de limites à la manifestation de cette violence. Chacun des adversaires fait la loi de l'autre, d'où résulte une action réciproque qui, en tant que concept, doit aller aux extrêmes[437] »*

2.5.1 Origines et objectifs des Conventions de la Haye

Les progrès scientifiques et techniques qui jalonnèrent la première moitié du XIXe siècle ont largement profité à la sphère militaire et ont rebattu durant ce siècle les cartes dans l'art et la manière de conduire une guerre. Deux innovations majeures révolutionnèrent fondamentalement les tactiques et stratégies militaires. La première était l'essor du chemin de fer à travers toute l'Europe qui permettait en un temps record de déplacer de grandes quantités d'hommes et de matériels sur le théâtre des opérations. La seconde était l'Artillerie dont les progrès dotèrent les armées de canons, d'une précision, d'une portée et d'une puissance de feu jamais encore vues. Des faits d'armes sanglants firent la démonstration du pouvoir d'attrition inédits de ces armes au combat : batailles de Gettysburg (du 1er au 3 juillet 1863, guerre civile de Sécession aux Etats-Unis), de Saint-Privat (ou bataille de Gravelotte, le 18 août 1870, guerre franco-prussienne), de Pelwna (siège du 20 juillet au 10 décembre 1877, guerre russo-turque de 1877 à 1878) et de Moukden (20 février au 10 mars 1905, bataille décisive de la guerre russo-japonaise). Enfin, les recherches en chimie menées par les grandes puissances industrielles en Europe firent planer la menace d'usage d'agents chimiques toxiques sur les champs de bataille. Les progrès scientifiques semblaient sans limites pour le bien de l'humanité, mais entrainaient aussi avec eux des perspectives bien plus sombres, celles d'un pouvoir de destruction des armes lui aussi infini mais entre les mains d'armées nations comme celles rassemblées à la faveur des guerres révolutionnaires et napoléoniennes. Cette prise de conscience de l'ascension incontrôlé des pouvoirs de destruction et d'attrition conduisit la diplomatie internationale à chercher à réguler, par le droit, la guerre par une réponse humaniste à l'inhumain.

Le 22 août 1864 fut signée la première Convention de Genève à l'initiative du genevois Henri Dunant, marqué par le traitement des blessés après la bataille de Solferino (24 juin 1859). Elle dictait les règles de conduite à adopter en période de conflits armés. En 1874, la Déclaration de Bruxelles (projet d'une Déclaration internationale concernant les lois et coutumes de la guerre. Bruxelles, 27 août 1874) interdisait l'utilisation de « *poison ou d'armes empoisonnées*[438] » (Article 13); elle ne fut pas ratifiée.

Les Conventions de La Haye de 1899 et 1907 furent les premiers traités internationaux multilatéraux qui traitaient de la conduite de la guerre. Paradoxalement, contrairement aux apparences, ces conférences de la paix n'avaient aucune visée pacifiste mais avaient pour but de codifier les normes coutumières de la guerre et de prévenir le développement et l'usage d'armes toujours plus destructrices.

---

[436] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie*, *op. cit.* p. 37.

[437] Karl von Clausewitz. *De la Guerre*, *op. cit*. p. 53.

[438] https://ihl-databases.icrc.org/assets/treaties/135-DIH-7-FR.pdf

Simples déclaration d'intention, ces conventions *erga omnes* (valables à l'égard de tous) n'avaient aucun caractère juridiquement contraignant. Elles étaient par ailleurs dépourvues de tout organe et de dispositif de contrôle du bon respect de ses clauses.

2.5.2 La première conférence de la Haye (1899)

La première conférence de La Haye fut à l'initiative du tsar Nicolas II (Nikolaï Alexandrovitch Romanov, empereur de toutes les Russies). Les actes finaux de la Convention furent signés le 29 juillet 1899 pour une entrée en vigueur le 4 septembre 1900. Elle incluait les dispositions de la Convention de Genève de 1864 pour le traitement des blessés et interdisait l'utilisation « *de poisons* », le meurtre des combattants ennemis qui se rendaient, le pillage d'une ville ou d'un lieu, et l'attaque ou le bombardement de villes ou d'habitations non défendues. Ses 36 signataires s'interdisaient « *l'utilisation de projectiles dont le seul objectif est de diffuser des gaz asphyxiants ou délétères*[439] » (section 2, chapitre 1, Article 23). Parmi les grandes puissances, seuls la Grande-Bretagne et les Etats-Unis refusèrent d'adhérer à ladite convention.

2.5.3 La seconde conférence de la Haye (1907)

La seconde conférence de La Haye (15 juin au 18 octobre 1907) fut convoquée à la suggestion du président américain Theodore Roosevelt en 1904. La seconde Convention prohibait en temps de guerre « *l'emploi de poison ou des armes empoisonnées*[440] » et « *d'employer des armes, des projectiles ou des matières propres à causer des maux superflus*[441] ». Si les agents chimiques « délétères[442] et asphyxiants » étaient interdits par les Conventions de La Haye, ceux « *corrosifs, puants, incendiaires* » ne l'étaient pas[443]. En 1914, quand la guerre fut déclarée, l'ensemble des parties engagées avaient ratifié la nouvelle convention. C'est dans ce contexte de prolifération des armes d'un pouvoir d'attrition et de destruction alors inédit, qu'on assista, en Europe et en périphérie, (i) à la récurrence de tensions entre les grandes puissances (France, Empires allemands, austro-hongrois, ottoman et russe) engagées dans des rivalités impérialistes et colonialistes (crises de Tanger (du 31 mars 1905 à 1906, au sujet de la colonisation du Maroc) et d'Agadir (1911), etc.), (ii) à la montée des bellicismes, exacerbés jusqu'aux confrontations armées (première guerre balkanique d'octobre 1912 au 19 avril 1913, suivie par la seconde guerre balkanique du 16 juin au 18 juillet 1913).

Les deux conférences de La Haye contre la prolifération des armes et pour la prévention de la guerre ne surent rompre une spirale menant l'Europe vers « *le grand abattoir international en folie*[444] ». La puissance d'attrition et de destruction des nouvelles armes était devenu telle que leur usage dans un conflit ouvert interétatique en Europe conduirait le continent à un désastre.

---

[439] https://ihl-databases.icrc.org/fr/ihl-treaties/hague-conv-ii-1899

[440] Ministère de la Défense, Bulletin officiel des armées, Direction de l'administration générale. *Traités et accords liant la France. : convention IV concernant les lois et coutumes de la guerre sur terre, signée à La Haye le 18 octobre 1907.* Imprimerie nationale, 1988, sect. II. Des moyens de nuire à l'ennemi : des sièges et des bombardements, ant. 23a, p. 757.

[441] *Ibid.*

[442] Substances classées comme délétères, proposées et plus particulièrement étudiées par la Commission des substances puantes en 1905 et 1906 : acide cyanhydrique, chlore, brome, oxychlorure de carbone.

[443] Lejaille, A. (1999). *La contribution des pharmaciens dans la protection individuelle contre les gaz de combat durant la Première Guerre mondiale - Extension à la période 1920 -1940.* Thèse de doctorat en Pharmacie (Université Henry Poincaré - Nancy I). Ce travail à été récompensé par l'Académie Nationale de Pharmacie en 1999 et a reçu le prix d'Histoire.

[444] Céline, F. (1932). *Voyage au bout de la nuit*.

La Première Guerre mondiale mit à l'épreuve ces premiers traités de droit international visant à codifier et réguler les usages de la guerre[445]. Le dramaturge norvégien Erik Ibsen écrivit avant-guerre pour qualifier à ce moment-là l'état de tension en Europe « *Nous naviguons avec un cadavre dans la cale*[446] ». Des conflits locaux, dans les Balkans (1912, 1913) ou en Russie (guerre russo-japonaise du 8 février 1904 au 5 septembre 1905), vinrent aussi augurer par leur caractère « préindustriel » ce que la Première Guerre mondiale allait inaugurer à savoir une brutale accélération du processus d'hyperbrutalisation de la guerre par l'usage méthodique des machines et en particulier, la mitrailleuse et les canons de l'Artillerie.

3. La Première Guerre mondiale sur le front occidental

3.1. 1914. DE L'ETE ROUGE SANG, GARANCE, A LA BOUE DES FLANDRES.

« Un coup de tonnerre dans un ciel bleu[447] ».

« [….] il suffisait de marcher sur l'ennemi pour le vaincre, le plus vite serait le mieux et il convenait de tenir pour accessoire tout ce qui n'était pas exclusivement la ruée en avant. Le feu devint un pis-aller. L'ouvrir était un dommage que l'on retardait le plus possible, l'entretenir était un péril car l'élan de la troupe pourrait s'y dissoudre[448] ».

Le 28 juin 1914, un nationaliste serbe assassina l'archiduc et héritier du trône de l'Empire austro-hongrois, François Ferdinand et sa femme à Sarajevo (actuelle Bosnie-Herzégovine). L'Autriche-Hongrie accusa la Serbie d'avoir commandité cet assassinat. Le *casus belli*, en fait la goutte faisant déborder le vase de la retenue pacifiste dans une Europe sous tension en proie à des bras-de-fer colonialistes, à des luttes d'influence, à des conflits locaux (dans les Balkans en 1912 entre nations slaves et chrétiennes et l'Empire Ottoman puis entre vainqueurs slaves en 1913). Au terme de quarante ans de montée en puissance des nationalismes, le jeu des alliances entre puissances via des traités de soutien (la Triple-Entente, entre la France, l'Empire britannique et la Russie d'une part et la Triplice ou Triple-Alliance entre l'Allemagne, l'Autriche-Hongrie et l'Empire Ottoman d'autre part) précipitèrent en quelques jours seulement l'Europe, et au-delà, dans un conflit majeur généralisé d'une dimension et d'une violence jamais encore connues. Ce processus de ruptures diplomatiques et de militarisation des relations interétatiques, conduisant de la paix de la Belle époque à une guerre d'un genre nouveau fait encore débat « *Il n'est pas sûr que la Grande Guerre ait eu de véritables causes, facilement identifiables, mais il est resté dans les mémoire que cette guerre était fatale*[449] ». Des maladresses diplomatiques sont aussi évoquées, dans la volonté des parties à enrayer l'escalade des tensions devant mener à la guerre.

---

[445] Cerovic, M. (2024). « *Civiliser la guerre. La violence et la guerre », L'Histoire* n°521-522, juillet-Août 2024, pp 90-99.

[446] Tuchman, B. (1967). *L'Autre Avant-Guerre. 1890-1914*. Paris, Plon, cité dans Jeanneney, J.N. (2013). *La Grande Guerre si loin, si proche. Réflexions sur un centenaire*. Le Seuil. p.25.

[447] Stefan Zweig. *Seuls les vivants créent le monde*. Bertrand Dermoncourt (commentateur (texte)). David Sanson (traducteur). 2018.

[448] De Gaulle, C. (1944). *Le Fil de l'Epée*. Collection Tempus. Editions Perrin. p. 109.

[449] Becker, J.J., Krumeich, G. (2012). *La Grande Gueerre. Une histoire franco-allemande.* Texto. Editions Tallandier. p.15.

L'une des causes revendiquée est celle d'un jeune empire allemand, né en 1871 à Versailles de la défaite humiliante française de 1870, agressif, souhaitait s'affirmer parmi les grandes puissances, et qui se sentait pris en tenaille par des puissances hostiles avec à l'est l'empire russe et à l'ouest le couple République française et Empire britannique.

L'Allemagne, se plaça en 1914 dans une posture de guerre défensive prit l'initiative au nom de la « légitime défense » et commença par déclarer la guerre à la Russie le 1er août 1914 suite à l'entrée en guerre de l'Empire austro-hongrois, contre son allié slave, la Serbie.

Ce vaste pays, essentiellement rural, aux voies de communication surannées, pensait-on en Allemagne, devait mettre du temps à mobiliser pleinement. Il fallait régler le compte à la France, le perdant de 1870, selon un schéma analogue à la guerre franco-prussienne, en quelques semaines, avant de focaliser ses efforts militaires contre la Russie. Les Français étaient de leur côté aussi confiants dans une issue rapide et victorieuse sur l'Allemagne, forts de leur plan offensif XVII (cf. Figure 81). Les Conventions de La Haye furent motivées par cette prise de conscience internationale de l'existence au sein des arsenaux des grandes puissances et empires d'armes d'une puissance encore jamais vue jusqu'alors et que leur usage massif risquait de conduire l'Europe à la ruine et la destruction. Alors une guerre courte devait limiter les pertes et les destructions « *Il y avait une sorte d'accord tacite, entre les Etats, pour que la guerre se décide vite, pour un camp ou pour l'autre, par une offensive victorieuse*[450] »

Le 31 juillet 1914, le jour de la déclaration de guerre de l'Autriche-Hongrie contre la Serbie, l'ordre de mobilisation générale fut décrété en France et, conformément au plan XVII, le GQG (Grand Quartier Général) amassa l'essentiel de ses troupes à l'est, en Lorraine, face à la Belgique, au Luxembourg, à l'Allemagne et au versant lorrain du massif des Vosges. La mobilisation française s'échelonna du 2 au 18 août 1914 (cf. Figure 81). L'Allemagne ne s'attendait pas à l'entrée en guerre de l'Angleterre qui s'était engagée à défendre la neutralité de la Belgique. Le 2 août 1914, le *Kaiser* (empereur) Guillaume II adressa un ultimatum à la Belgique neutre, réclamant le libre passage de ses troupes en direction du nord de la France, faute de quoi la Belgique serait considérée comme un obstacle, un opposant ennemi. L'Allemagne déclara la guerre à la France le 3 août 1914. Le 4 août, les Allemands pénétrèrent et déferlèrent en Belgique pour attaquer la France par le nord suivant les lignes de conduite stratégiques du plan Schlieffen, violant ainsi la neutralité du pays malgré les injonctions d'Albert 1er, roi des Belges, de respecter la neutralité du pays[451]. En bafouant la neutralité de la Belgique, c'était ainsi au tour de l'Empire britannique de basculer. Tout se précipita alors : le 4 août 1914 l'Angleterre déclara la guerre à l'Allemagne, le 6 août 1914, l'Autriche-Hongrie à la Russie, le 11 août 1914, la France à l'Autriche-Hongrie et le 13 août 1914 le Royaume-Uni à l'Autriche-Hongrie. Les Français prirent l'initiative de l'offensive, mettant en application les stratégies prévues au plan XVII, en marchant sur les territoires annexés du *Reichsland Elsass-Lothringen* (territoire impériaux d'Alsace et de Lorraine, actuels départements du Haut- et du Bas-Rhin et de la Moselle), en contournant le massif des Vosges, au nord en direction de Metz (actuel département de la Moselle) et de Sarrebruck (actuel Land de Sarre, Allemagne), au sud, via le seuil de Belfort, en direction de Mulhouse en Haute-Alsace.

---

[450] Entretien avec Gerd Krumeich *« Il y a eu jusqu'au bout, un tel aveuglement…* » La Première Guerre mondiale. 2e partie. 1914-1918. Au cœur des grandes batailles. GEO Histoire n°13. p. 26

[451] Le Roi adressa une missive en allemand à Guillaume II le 1er août 1914 : « Votre Majesté et cher cousin, la guerre qui menace d'éclater entre deux puissances voisines me plonge dans de graves réflexions […]. Les relations de parenté et d'amitié qui unissent étroitement nos deux familles m'ont incliné à t'écrire et à te prier aussi, dans ces heures graves, de me donner, ainsi qu'à mon pays, la garantie que notre neutralité sera respectée » La lettre a été rédigée en Allemand avec l'aide de la reine des belges Elisabeth (Élisabeth Gabrielle Valérie Marie de Wittelsbach, duchesse en Bavière, nièce de l'impératrice Sissi, 1876-1965) qui dira, déçue par la posture allemande « entre eux et moi un rideau de fer est tombé ». Elle aurait été à l'origine de ce terme qui sera utilisé pendant la Guerre froide pour désigner la frontière entre blocs occidentaux et soviétiques.

Conformément à la demande du roi Albert 1er et aux garanties franco-britanniques concernant le Belgique neutre, trois divisions françaises de cavalerie pénétrèrent en Belgique via les Ardennes, pour s'opposer aux avant-lignes allemandes du général Manfred Karl Ernst Freiherr Von Richthofen. Débuta alors l'un des épisodes les plus sanglants et meurtriers de la Première Guerre mondiale connu sous le nom de « bataille des frontières », un terme générique qui désigne un ensemble d'affrontements entre les troupes allemandes et franco-britanniques le long des frontières franco-belge et franco-allemande entre le 7 et le 23 août 1914. Ces batailles furent engagées, pour certaines, à la faveur de rencontres inopinées, sans lignes directrices tactiques pour la conduite de ces opérations. Il s'agit aussi du seul épisode de la Grande Guerre où le combat fut engagé en territoire (annexés) allemand, en Moselle et en Alsace.

La première confrontation sérieuse entre forces françaises et allemandes eut lieu le 11 août 1914 dans le sud du département de la Moselle, à Lagarde (*Gerden* pour les Allemands) ; l'infanterie française fut mise en déroute par l'artillerie et les mitrailleuses allemandes (cf. vue d'artiste de la Figure 79 page suivante). En Belgique les Allemands poursuivaient leur progression en réduisant au silence les points de défense fortifiés belges. Liège, l'une des principales places fortes belges, tomba le 13 août 1914, écrasée par l'artillerie lourde de siège adverse.

Implacablement et méthodiquement, l'Infanterie, pantalons et casquettes rouge garance, les dragons de la Cavalerie aux heaumes et plastrons scintillants, manœuvrèrent selon la doctrine militaire en vigueur au sein de l'armée française, basée sur « *une métaphysique absolue de l'action*[452] ». L'usage de l'Artillerie était négligé dans l'armée française en 1914. L'attaque contre les Allemands était « *une ruée désordonnée vers l'avant* [453]». Pour les Français cette bataille des frontières, tourna au désastre, en une cruelle déconvenue, la « *Furia Francese* » se rua et se brisa à découvert contre l'armée allemande déjà dotée de l'Artillerie la plus puissante et la plus moderne au monde et de mitrailleuses performantes.

La première bataille des frontières, encore désignée par « bataille de Lorraine », fut déclenchée le 19 août 1914. Le général Ferdinand Foch à la tête du XXe Corps d'armée lança une offensive en direction de Morhange, Sarrebourg (actuel département de la Moselle), par la trouée de Saverne pour couper Strasbourg de Metz et les garnisons allemandes. Les Français, après leur avancée, furent délogés de Morhange par une vigoureuse contre-attaque (bataille de Morhange, ou « *Schlacht bei Mörchingen* », du 19 au 20 août 1914). En parallèle, la bataille de Sarrebourg (du 18 au 20 août 1914) mit aux prises la Ire Armée française du général Augustin Dubail et la VIIe Armée allemande du général Rupprecht de Bavière. Là aussi ce fut un échec, forçant les Français à la retraite. Le 20 août 1914, le général Edouard De Castelnau ordonna le repli général sur la rivière Meurthe pour organiser la défense de Nancy (département de la Meurthe-et-Moselle).

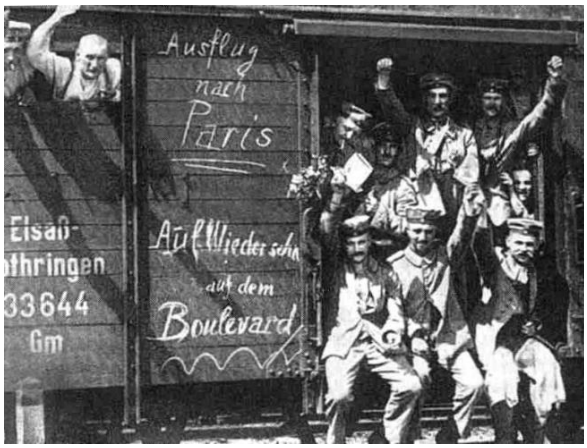
[452] De Gaulle, C. (1944). *Le Fil de l'Epée*, *op. cit*. p. 108.

[453] *Ibid.,* p. 111.

Figure 79 : Bataille de Lagarde (département de la Moselle.) La charge des Uhlans (de la IVe Brigade de cavalerie bavaroise) contre l'Infanterie française le 11 août 1914. Vue d'artiste d'après une gravure de Zimmer 1914. Collection particulière. Il existe très peu de clichés conservés aux archives relatant la violence de cette période de guerre de mouvement. Par contre proliférèrent dans l'après-coup de cet épisode extrêmement violent et meurtrier de la Grande Guerre des représentations d'artistes, rarement objectives[454]. Dans le cas présent, c'est bien l'artillerie allemande qui fut décisive et non la cavalerie.

[454] Collection particulière. Communication personnelle.

Train de mobilisés gare au départ de Vienne[455]



Train de mobilisés allemands[456]

Figure 80 : Trains de mobilisé et le départ vers le front en 1914. Les deux camps partagent la même ferveur patriotique, les uns se voient à Paris, les autres à Berlin.

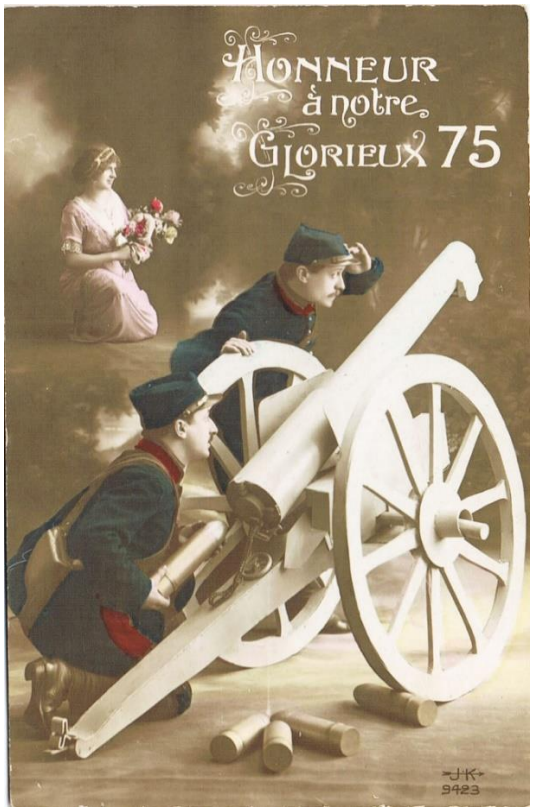


Figure 81 : Cartes patriotiques françaises de 1914 glorifiant (i) le canon de campagne de 75 mm (à droite). fer de lance de l'artillerie française dans la guerre de mouvement (ii) la ferveur de l'armée s'apprêtant à reproduire la campagne napoléonienne et la prise de Berlin en 1806 (à gauche)[457]*.*

---

[455] Musée militaire de Lyon. La mobilisation générale de 1914 à Lyon et dans la région. https://museemilitairelyon.com/2021/08/29/la-mobilisation-de-1914/

[456] 1er août 1914. akg-images / Alamy Banque D'Images. https://www.alamyimages.fr/photo-image-9-1914-8-0-a5-mobilisation-de-troupes-allemandes-1914-histoire-premiere-guerre-mondiale-mobilisation-aout-1914-depart-d-un-train-a-destination-de-troupes-20740318.html

[457] Collection particulière, D. Hubé.

Les forces françaises reçurent l'ordre « *d'enlever Mulhouse à la course* » et « *d'y mettre le prix*[458] », pour se diriger ensuite vers le nord et sur Colmar (département du Haut-Rhin). Les Allemands d'abord surpris laissèrent Mulhouse aux Français. Dans l'après-midi du 8 août 1914 les Français entraient sans combat dans la ville, défilant musique en tête et faisant afficher une proclamation du général Joseph Joffre. Le lendemain 9 août 1914, aidés par d'importantes forces, laissées en réserve en rive droite du Rhin, les Allemands d'une partie de la VIIe Armée allemande du général Josias Von Heeringen contre-attaquèrent, contraignant le corps d'armée français à se retirer le 10 août 1914 sous la protection de la place fortifiée de Belfort. Après avoir repris Mulhouse et, les Allemands repoussèrent les Français sur le versant lorrain des crêtes vosgiennes.

Les Français pénétrèrent aussi en Alsace en direction de l'est par la vallée de la rivière Bruche qui forme un boulevard naturel une fois le col de Saale franchi, en direction de Strasbourg. Mais son débouché, peu avant la plaine d'Alsace, était contrôlé par le fort allemand de Mutzig (*Feste Kaiser Wilhelm*) qui, doté de redoutables pièces d'artillerie lourde, était le plus imposant de la Première Guerre mondiale. Les Français furent stoppés net dans cette vallée le 18 août 1914 par le fort de Mutzig.

L'offensive en Haute-Alsace et dans le massif des Vosges, s'appuyait avant tout sur des motivations plus symboliques que réellement stratégiques: foncer sur Mulhouse, Strasbourg pour reconquérir les territoires annexés perdus en 1871 afin de renforcer l'adhésion de la population à cette guerre, et stimuler la ferveur patriotique.

Figure 82 : "Episode de combats dans les Vosges entre troupes coloniales françaises (Zouaves et Sénégalais) et les Uhlans". Carte postale[459].

Le BEF (*British Expeditionary Force*) du général Douglas Haig, fut envoyé sur le continent pour s'opposer à la Ire Armée allemande qui progressait en Belgique. Le contact eut lieu à Mons. Les soldats britanniques étaient d'excellents combattants expérimentés et professionnels. Les positions britanniques tinrent un temps, mais les Allemands, en supériorité numérique, forcèrent les Britanniques au repli au terme de la bataille de Mons (22 au 24 août 1914).

A compter du 23 août 1914, la poussée allemande en Picardie, en Champagne et en Lorraine força les troupes françaises à se replier d'abord sur les rives de la Meuse puis de la Marne et les forces britanniques sur la rivière Aisne. Plus au sud, en Lorraine, la retraite des armées françaises s'effectua aussi en bon ordre et intelligence.

[458] Message téléphoné de Général Dubail à général Bonneau (directement). 8 août 1914 à 9 h 30, cité dans Naërt et al. 1922, volume 1, tome 1, annexe no 113, p. 131-132.

[459] Collection Detlev Brum. Krieg an der Westfront – Schwarz-Weisse-Begegnungen. Der Krieg auf dem Schlachtfeld und in den "Bezirken der menschlichen Phantasie" Dortmund-postkolonial. Une vision vraisemblablement très raciste et partisane de l'écrasement par le supématie blanche allemande de la « négritude » des troupes coloniales françaises.

Le repli français ne fut pas une débandade généralisée, contrairement aux représentations qui prévalaient dans l'imaginaire des Allemands, mais s'effectua au contraire de façon organisée et ponctuée par des batailles d'arrêt permettant de ralentir les Allemands et de couvrir le repli comme la bataille du Cateau [460]et la bataille de Guise (département de l'Aisne). Durant cet épisode, les Français remportèrent aussi leur première victoire, lors de la bataille d'Etain-Buzy (département de la Meuse) dans la Woëvre, les 24 et 25 août 1914. Les Français se ressaisirent aussi en contrant localement les Allemands lors des batailles de la Trouée de Charmes (département des Vosges) au sud de Nancy et de Lunéville (département de la Meurthe-et-Moselle), de la Meurthe autour de Saint-Dié-des-Vosges (département des Vosges).

A partir du 04 septembre 1914, le général Rupprecht de Bavière lança son armée dans une nouvelle offensive pour tenter de percer le front en direction de la Champagne. Pour cela, après l'échec de Charmes, il envisagea d'attaquer frontalement Nancy et par la prise de cette ville mettre à mal psychologiquement les Français. Il lui fallait pour cela enfoncer les défenses aménagées à la faveur du relief par les Français, sur les hauteurs est de Nancy, connues sous le nom de « Grand-Couronné ». Mais le général Edouard De Castelnau réussit à contrer les Allemands qui finalement, le 12 septembre, renoncèrent et se replièrent. Cette bataille permit de contenir du 04 au 12 septembre 1914, plus de 300 000 bavarois, les fixant, les empêchant de se déporter sur la Marne.

Les Allemands progressèrent sur le sol français en direction de Paris et atteignirent Meaux (département de la Seine-et-Marne), à 40 km à l'est de la capitale. Du 29 août au 2 septembre 1914, le gouvernement français quitta Paris pour s'installer à Bordeaux, laissant la capitale sous le gouvernement militaire du général Joseph Gallieni.

[460] La Bataille du Cateau, remportée par les britanniques est la plus grande bataille de sa majesté depuis Waterloo.

3.1.1 La contre-offensive française sur la Marne

« *Un sursaut d'efforts anime le défenseur en danger tandis que l'envahisseur victorieux peut relâcher les siens* » […] « *Tout cela contribue à grever chaque pas supplémentaire d'une armée en progression ; à moins qu'elle ne jouisse d'une exceptionnelle supériorité, elle verra sa marge de manœuvre de plus en plus restreinte […]*[461] »

Le général Von Klug commandant la Ire Armée allemande, commit alors une erreur stratégique majeure. Galvanisé par le succès et la rapidité de la percée allemande en France, au lieu de se conforter au plan Schlieffen (qui prévoyaient la marche sur Paris et l'encerclement de la capitale), il prit la décision de sa propre initiative, sans en référer à l'OHL (*Oberste Heeresleitung* le Grand Quartier Général allemand avec à sa tête le colonel général Helmuth Johannes Ludwig von Moltke[462], cf. Figure 83 ci-contre), d'en finir avec l'Armée française qu'il pensait en débandade par une manœuvre en pivot (en « coup de faux ») de ses troupes en direction du sud-est pour acculer l'Armée française contre les Vosges et la Suisse et la détruire. Les aviateurs français en reconnaissance s'aperçurent du changement de direction des Allemands. Les armées allemandes exposèrent ainsi aux Français leur flanc droit affaibli par des effectifs insuffisants.

Figure 83 : Colonel General Helmuth Johannes Ludwig Von Moltke (dit « Le jeune ») (1916) (1848-1916) [463].

Dès le 4 septembre, le général Joseph Joffre ordonna à l'ensemble de ses troupes d'arrêter la retraite et de faire front. Le lendemain, il leur adressa cette missive, les incitant au combat et à résister à tout prix « *Une troupe qui ne peut plus avancer devra coûte que coûte garder le terrain conquis, et se faire tuer sur place, plutôt que de reculer. Dans les circonstances actuelles, aucune défaillance ne peut être tolérée* ».

Joffre savait aussi que le rapport de force en matière d'effectif s'était inversé. Des ordres et contre-ordres émanant de l'OHL semèrent la confusion parmi les 160 000 soldats allemands à faire marcher et « tourner ». L'Armée de Paris fut mobilisée et monta au front au moyen notamment de quelques « taxis de la Marne » qui restèrent sans portée stratégique mais, dans la mémoire collective, hautement symbolique de ce sursaut défensif français. Joffre attaqua d'abord dans le secteur particulier de la rivière Ourcq le 5 septembre. Les Français et les Anglais s'arrêtèrent le lendemain sur un front allant de Bar-le-Duc à la Seine-et-Marne, puis lancèrent une contre-offensive générale dont le succès resta toutefois limité par l'épuisement des soldats et les pertes dramatiques en hommes. Cette première bataille de la Marne mobilisa du 6 au 9 septembre 1914 près d'un million de combattants de tous camps et enraya l'avancée allemande au prix de très lourdes pertes : 227 000 Français (21 000 morts, 84 000 disparus et 122 000 blessés) 37 000 Britanniques (3 000 morts, 4 000 disparus et 30 000 blessés) 256 000 Allemands (43 000 morts, 40 000 disparus et 173 000 blessés).

---

[461] Carl von Clausewitz, ouvrage cité, livre VII « *L'attaque* », chapitre XXII « Le point culminant de la victoire », p. 284.

[462] Neveu de Helmuth Karl Bernhard von Moltke (dit « Moltke l'Ancien »). le général prussien puis maréchal et surtout ancien chef de l'Etat-Major général pendant les guerres de 1866 contre l'Autriche et de 1870-1871 contre la France.

[463] Helmuth Johannes Ludwig Von Moltke. Staatsbibliothek zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz. https://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht/?PPN=PPN766452891

Les troupes allemandes furent contraintes à un recul de 40 à 80 kilomètres, en se fixant sur l'Aisne, sur des remparts défensifs naturels, comme le promontoire du Chemin des Dames. Von Moltke fut écarté et remplacé à la tête de l'OHL par le Ministre de la Guerre Erich Von Falkenhayn le 14 septembre 1914.

3.1.2 La bataille de la Woëvre

Du 20 au 27 septembre 1914, les Allemands reprirent l'initiative de l'offensive et enfoncèrent les positions françaises en Lorraine, entre les rivières Moselle et Meuse (bataille de la Woëvre) pour essayer de prendre Verdun par le sud. Le *Kronprinz* (fils du *Kaiser* Guillaume II)[464] (cf. Figure 84 ci-contre) à la tête de son armée, carriériste et politique, s'était fait de la prise de cette position française, historiquement symbolique et emblématique, une affaire personnelle. Il voulait Verdun. Les Allemands furent stoppés par une résistance française, créant toutefois un saillant dans les positions françaises autour de Saint-Mihiel, au sud de Verdun, qui ne sera résorbé que lors de l'offensive américaine de septembre 1918. Cette géographie du front en Meuse scella dès 1914 celle des grandes batailles qui allaient suivre, en 1915, 1916 puis 1918.

Figure 84 : Le Kronprinz dans la région de Verdun (non daté)[465].

3.1.3 Des grandes certitudes aux désillusions

Aucune des parties n'avait imaginé que leur plan offensif respectif puisse être déjoué.

Tout comme le plan XVII des Français, le plan Schlieffen-Moltke fut un échec. Les tactiques d'antan se montrèrent aussi vaines que meurtrières. Cette première explosion de violence « *fut d'une telle ampleur qu'elle infligea d'emblée un démenti cinglant à toutes les anticipations développées au cours des années antérieures au conflit* [466]». Les trois premiers mois de la guerre furent en effet les plus meurtriers de la Grande Guerre : plus de 160 000 morts rien que pour août et septembre 1914 soit plus de 10% des pertes de plus de quatre années de guerre. Les grandes certitudes d'août 1914 laissèrent place aux désillusions à l'automne 1914 : la guerre n'allait pas trouver d'issue à court terme, en quelques semaines mais s'inscrire de façon inattendue dans la durée. Le souci ? Focalisées sur leur plan offensif victorieux, aucune des parties belligérantes n'avait imaginé de plan B en cas de revers.

L'échec du plan Schlieffen et de la guerre éclair à l'encontre de la France plaça l'Allemagne dans une posture qu'elle avait redouté : avoir à se battre simultanément sur deux fronts, à l'ouest contre les franco-britanniques et à l'est, appuyée par son allié austro-hongrois, contre l'Empire russe.

---

[464] Friedrich Wilhelm Ernst Victor August de Prusse, *Kronprinz* impérial d'Allemagne et de Prusse.

[465] Friedrich Wilhelm von Hohenzollern, Kronprinz, im Felde um Verdun. Photographie originale / Original photograph. Date d'édition : 1914. https://www.abebooks.fr/photographies/Friedrich-Wilhelm-Hohenzollern-Kronprinz-Felde-Verdun/30636172467/bd

[466] Audoin-Rouzeau, S., A. Becker. A. (2014). *1914-1918, retrouver la guerre*. Editions Gallimard. 214 p.

3.1.4 La course à la mer

S'ouvrit alors à l'issue de la première bataille de la Marne, la dernière phase de la guerre de mouvement entre la mi-septembre 1914 et décembre 1914, connue sous le nom de « la course à la mer » qui se conclut par la fixation et la stagnation du front occidental. Les leçons tirées des échecs de la guerre offensive à outrance de l'été 1914 « *ne s'imposèrent dans l'esprit des militaires français qu'avec lenteur et regret*[467] ». Ces combats de l'hiver 1914-1915 procédèrent suivant le même schéma et la conviction que l'offensive était intrinsèquement avantageuse quelles que soient les circonstances et l'importance ou la déficience des moyens. Le front ne devait pas s'enliser pour permettre la poursuite de la guerre de mouvement. Il s'agissait de tenter de déborder l'adversaire par des manœuvres réciproques en direction du nord, par une série de batailles sur des secteurs restreints en Picardie (Aisne et Oise) et en Artois. Pour les Allemands c'était aussi mettre *in fine* définitivement hors-jeu la Belgique et d'acculer le BEF au réembarquement, laissant les Français seuls pour se défendre. Les armées épuisées au terme de la première bataille de la Marne furent relevées ou renforcées par des troupes retirées du front de Lorraine, des Vosges et de Haute-Alsace. Cet épisode de la Grande Guerre se termina à Ypres, en Flandre occidentale (Belgique). Deux grandes batailles se déroulèrent alors sur le sol belge : la bataille de l'Yser (ou bataille des Flandres) et la première bataille d'Ypres, entre le 18 octobre et le 11 novembre 1914 auxquelles prirent part des troupes françaises (au Mont Kemmel).

Le 24 octobre 1914, les Belges exploitèrent les spécificités de leur terrain, puisant dans leur histoire comment arrêter l'avancée d'un ennemi[468]. Ils ouvrirent les vannes des écluses de Nieuport et inondèrent artificiellement les polders[469] de la région de l'Yser, créant une lame d'eau faisant barrage à la progression allemande et causant aussi par cette sape hydraulique l'éboulement des premières tranchées allemandes par la remontée de la nappe phréatique (cf. Figure 85 ci-contre). La seconde conséquence de la neutralisation de la région de l'Yser fut de déporter plus au sud les enjeux stratégiques dans la région d'Ypres-Wytschaete-Messines et les Monts des Flandres. Le 27 octobre 1914, les Allemands lancèrent une vaste offensive déclenchée au nord, à l'est et au sud d'Ypres et qui reste, en Allemagne, tristement célèbre. L'inexpérience des jeunes troupes allemandes face à une armée britannique professionnelle, la tactique des assauts en masse entraînèrent des pertes énormes, notamment à Langemark. Ces opérations furent surnommées « le massacre des enfants » (*Kindermord*).

Figure 85 : Affiche en mémoire des opérations belges sur l'Yser, novembre 1914[470].

[467] De Gaulle, C. (1944). *Le Fil de l'Epée*. *op. cit*. p. 113.

[468] https://theconversation.com/barrage-detruit-en-ukraine-retour-sur-une-tactique-militaire-ancienne-209424 et D. Hubé (2017). *14 – 18 Tremblements de guerre. Les géologues au cœur de l'Histoire*. BRGM éditions. p. 63.

[469] Terrains artificiellement asséchés et situés sous le niveau de la mer.

[470] Imperial War Museum, number ART 5004 5.

Les conditions météorologiques exécrables rendirent les combats particulièrement éprouvants. La première bataille d'Ypres prit fin lorsque la neige et le gel firent en sorte que toute opération était impossible. En décembre 1914, les armées allemandes échouèrent sur tout le front des Flandres. La « Mêlée des Flandres » inaugura dans cette portion stratégique du front, la fin de la guerre de mouvement et des combats à découvert. Un saillant des positions alliées dans celles des Allemands se forma, dénommé le « Saillant d'Ypres » avec sur son flanc sud le saillant allemand dans les positions alliées de la « Crête de Messines-Wytschaete[471] ».

3.1.5 « *Des canons, des munitions* ». La crise des munitions de 1914.

« Nous manquions d'usines, de machines, de personnel, de matières premières ![472] »

Origines

Aucune des parties n'avait imaginé une guerre inscrite dans la durée et de fait n'avaient pas constitué de stocks de projectiles, poudres et explosifs dépassant une consommation de quelques semaines pour soutenir des tactiques d'une guerre de mouvement qui se voulait éclair. Dès les combats d'août 1914 la consommation de munitions était déjà considérable et dépassait toutes les prévisions.

La consommation la plus intense concernait les obus explosifs alors que les caissons en dotation étaient pourvus de trois obus à balles pour cinq engins explosifs. De nombreux corps d'artillerie avaient tendance à refuser les obus à balles et à n'accepter que les obus explosifs dans les lots dont ils prirent livraison aux centres de ravitaillement. Le Général Commandant en Chef Joffre invita les commandants des corps d'armée à éviter cette pratique. C'est ainsi que les stocks de munitions explosives fondirent en septembre 1914, pour devenir critique au moment où la perspective d'une guerre inscrite dans la durée se faisait réalité et que les Français se devait de consolider leur position chèrement gagnée au terme des combats particulièrement meurtriers de la première bataille de la Marne. En septembre 1914, la question du ravitaillement en munitions devint de plus en plus pressante et cruciale dans le contexte du durcissement de la résistance des armées allemandes qui progressivement s'installèrent sur des positions défensives. Dès le 9 septembre 1914, le Général Directeur de l'Arrière rendit compte au Ministre de la Guerre que « *par suite des circonstances, il a dû faire appel à la presque totalité des munitions de 75 des entrepôts de réserve générale. Il le prie de prendre d'extrême urgence les dispositions utiles pour ravitailler ces entrepôts*[473] ». Sur le front, les artilleurs craignaient de se « *trouver contraints, pendant la suite de la campagne, à l'emploi à peu près exclusif des obus à balles* [474]». En septembre 1914, l'artillerie française avait déjà consommé la moitié du stock d'obus de 75 mm. Les besoins en munitions s'avérèrent contre toute attente, énormes : 50 000 coups par jours alors que l'industrie française était en mesure de fournir seulement 14 000 unités. Tenir le front sans munitions était impensable, irréaliste.

---

[471] A prononcer « vitchcate ».

[472] Bibliothèque nationale de France. Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions*, *op. cit*. p. 8.

[473] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre.* Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, Etat-Major de l'armée, service historique. 1930. GQG DA. Télégramme au Ministre de la Guerre, 2887, 18 heures, 9 septembre 1914.

[474] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, Etat-Major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Note pour les armées, 5205, 14 septembre 1914. Annexe 7.

Le 19 septembre 1914, le général Manoury (commandant la VIe Armée) télégraphia au commandant en chef Joffre en tirant encore la sonnette d'alarme « *Quatre derniers lots de munitions mis en distribution aujourd'hui ; il est indispensable de nous envoyer de nouveaux lots sous peine de voir cessez le feu demain*[475] ». Les Allemands subirent les mêmes difficultés sans que l'Etat-major français en ait connaissance.

Le 13 aout, alors que le plan Schlieffen semblait aboutir sur le front occidental, le *Allgemeines Kriegs' Departement* envoya un message anxieux vers le Service des Munitions « *La consommation de munitions dans les batailles initiales a été si grande que nous devons employés tous les moyens possibles de puiser dans et faire usage de toutes les sources potentielles pour la production de munitions* [476]».

Pire, les industries de l'armement, des poudres et explosifs, monopoles d'Etat en France, peu réactives, ne s'étaient pas préparées à devoir brutalement subvenir aux besoins qualitatifs et quantitatifs en munitions des armées en campagne. La guerre moderne inaugurée en août 1914 provoqua cette rupture inédite, inattendue de l'équilibre entre la production de munitions et leurs (hyper)consommations. La crise des munitions devait trouver urgemment une issue, par des leviers politiques, pour espérer tenir le front et poursuivre la guerre. Les premières mesures pour remédier à l'urgence furent immédiates, pragmatiques et militaires.

Premières parades militaires pour parer aux carences en munitions

Elles consistèrent pour le GQG à ordonner aux artilleurs de réduire les tirs au strict minimum nécessaire pour garantir la sécurité et la stabilité du front. Il était *« indispensable ménager sévèrement les munitions et surtout utiliser les obus à balles dans nombreuses circonstances où il est efficace* [477]». L'usage des obus à balles dont l'Artillerie fut dotée et encore en réserve, car peu utilisés dans les premiers instants de la guerre, fut, si possible, privilégié. Par ailleurs, Joffre interdit les tirs sans objectifs bien définis, sur des zones larges, en un mot il intima de proscrire « *la canonnade sans but défini*[478] » écrivit-il. Ces instructions visaient plus particulièrement les Ve (sous le commandement du général Franchet d'Esperey) et VIe armées (sous le commandement du général Manoury), les combats se déplaçant vers le nord fin septembre 1914 dans la course à la Mer. « *Le 20 septembre 1914, l'artillerie française avait consommé la moitié du stock existant d'obus de 75 mm, l'Artillerie ne disposait plus alors que de 15 jours de consommation*[479] ». Joffre, se fit insistant en s'adressant le 24 septembre 1914 par télégramme à tous les commandants d'armée « *actuellement arrière épuisé. Si consommation continue même taux, impossible continuer guerre faute de munitions dans quinze jours…conserver toutes munitions disponibles pour reprise offensive violente quand sera possible. Ne puis trop appeler toute votre attention sur importance capitale cette prescription d'où dépend le salut du pays. Accusez réception*[480] ».

---

[475] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, Etat-Major de l'armée, service historique. 1930. VIe Armée. Télégramme au général commandant en chef, 9910, 12h25, 19 septembre 1914. Annexe 16.

[476] Johnson, J.A. (2006). « Technological mobilization and munitions production : comparative perspectives on Germany and Austria » p.5, in *Frontline and Factory : Comparative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914 – 1924*. Edited by MacLeod, R. University of Sydney and Johnson, J.A. Villanova University. Archimedes. New studies in the history and philosophiy of science and technology. Volume 16. Springer. 2006.

[477] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre.* Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, Etat-Major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Télégramme à général commandant la 6e armée, 6213, 19 septembre 1914. Annexe 13.

[478] *Ibid.*

[479] Colonel F. Guelton. (2004). « Les armées », in *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914-1918.* Sous la direction de Stéphane Audoin-Rouzeau et Jean-Jacques Becker. Bayard, 2004. p. 228.

[480] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, Etat-Major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Télégramme aux généraux commandant les armées, 6999, 24 septembre 1914. Annexe 29.

Le GQG chercha à tout prix des supplétifs. Les canons d'artillerie de forteresse, parfois obsolètes, furent démontés pour être acheminés au front pour renforcer au plus vite l'artillerie lourde insuffisante, des canons furent aussi produits aussi vite que possible, des armes et matériels furent réparés en hâte. Ces mesures étaient nécessaires mais insuffisantes. Après l'armée, c'était au tour de l'industrie d'être mobilisée dans le but unique de poursuivre la guerre et surtout de la gagner.

Nécessité et urgence d'un ressaut industriel pour alimenter la guerre

La seconde réponse aux carences en munitions fut structurelle et industrielle, inscrite dans un temps plus long. L'évitement de l'impasse militaire ne pouvait être solutionnée que par une réponse industrielle dans les meilleurs délais, une mobilisation massive de l'industrie et de sa main d'œuvre pour produire et livrer les armes et munitions réclamés par l'armée en campagne.

Les besoins de l'armée imposèrent d'emblée un cahier des charges à l'industrie articulé sur le triptyque (i) rapidité des livraisons au front, (ii) de quantités importantes de munitions, (iii) qui satisfassent, de par leur typologie, les exigences tactiques au combat. Mais trois obstacles se dressaient aussi sur le chemin sinueux menant à l'équilibre entre la satisfaction des besoins des armées et les capacités de l'industrie française à y parvenir : les matières premières, la main-d'œuvre et les usines qui faisaient défaut à l'été 1914.

A la mobilisation, les besoins des armées s'élevaient déjà à dix fois ce qu'il était possible de produire en France avec des usines tournant à plein régime. A la mi-septembre 1914, la demande des armées s'éleva à 100 000 unités d'obus de 75 mm par jour alors que les journaux de mobilisation n'avaient prévu qu'une production journalière de 13 600 unités « *c'était d'ailleurs environ deux fois plus que ce qui avait jamais été fait ou pouvait se faire en temps de paix, et il fallait au moins quelques semaines pour atteindre la production prévue*[481] ».

La percée allemande d'août 1914 en direction de Paris, fut une grande victoire militaire mais avant tout économique pour l'Allemagne. Elle réduisit les capacités industrielles françaises tout en insufflant de l'acier dans son armement sans lequel jamais elle n'aurait pu soutenir plus de quatre ans de guerre. En effet « *l'envahissement de nos départements du Nord et de l'Est avait réduit nos facultés de production des deux tiers pour la houille et de 85 p. 100 pour le minerai de fer* [482]». La houille était indispensable pour la production non seulement de coke, de fer, de fonte et d'acier mais aussi des nitrates et des hydrocarbures qui constituaient les matières premières de base pour la confection des poudres et explosifs. La rupture des liens commerciaux avec l'Allemagne priva aussi la France de certaines matières premières. La France fut ainsi aussi privée de plus de 90 % de sa capacité à produire du laiton, alliage de cuivre, indispensable à la fabrication des douilles d'obus ou d'armes portatives. La mainmise sur le bassin minier lorrain de Briey (département de la Meurthe-et-Moselle) permit à l'Allemagne de mener une guerre de matériel longue de plus de quatre ans. Ce bassin fut surexploité sous l'occupation allemande et fournit plus de 90% du fer allemand durant la Première Guerre mondiale. La moitié des aciéries, usines françaises furent occupées ou se retrouvèrent sous le feu des canons en Lorraine et dans le Nord Pas-de-Calais.

---

[481] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie*. *Les Canons – Les Munitions, op. cit*. p. 69.

[482] *Ibid.*

Le rapport de force entre la France et l'Allemagne en terme de matériel et munition d'artillerie devint de 1 pour 10. « *Quand nous construisons un canon, ils peuvent en construire 10. Quand nous fabriquons un obus, ils peuvent en fabriquer 20. Ils ont dans nos mines de charbon et de fer et dans les leurs toute la matière première nécessaire* ».

Enfin nombre d'ouvriers hautement qualifiés furent envoyés au front selon les exigences de la mobilisation égalitaire. Les décideurs, Commissions parlementaires et la direction de l'Artillerie, furent mis face à un cruel dilemme « *envoyer tous les hommes capables de porter les armes au front et à augmenter, en même temps, dans une mesure indéfinie, le personnel employé à tourner les canons et les obus*[483] ».

Les ateliers de construction d'armement et les usines de fabrication des poudres et explosifs (poudreries) étaient des établissements nationaux étatiques qui étaient alimentés en matières premières (acier, fonte, nitrates, etc.) par des entreprises privées. L'outil industriel restant fonctionnel en zone sous contrôle français était en août 1914 déjà bridé par d'une part les pénuries en matières premières et d'autre part par le manque de main d'œuvre. Le plein régime était une illusion. Cette situation des usines française de 1914 résultait de l'intime conviction, unanimement partagée par tous les pays, que la guerre qui venait d'être déclarée ne pouvait durer que quelques mois. Les matériels, munitions et approvisionnements en stock devaient suffire. Les marchés dits « de mobilisation » », de faible importance, étaient rédigés conformément à ces prévisions. La guerre était en marche. « *Il fallait faire face aux réalités qui se présentaient brutalement*[484] ».

Face à la crise des munitions de 1914, et aux impérieuses nécessités liées aux circonstances exceptionnelles de la guerre, les premières solutions industrielles furent apportées en faisant appel au pragmatisme, à la rapidité d'exécution et à certaines formes d'improvisation. A la fin septembre 1914, les ouvriers spécialisés qui avaient été initialement envoyés au front furent rappelés dans les usines et on fit aussi très largement appel à la main-d'œuvre féminine et aux recrutement de chômeurs. Des compagnies signèrent ainsi des contrats en promettant de mettre en œuvre des fabrications dont parfois elles ne maîtrisaient pas la technologie[485]. Jusqu'en 1916 des contrats furent passés oralement pour contourner les délais imposés par la lourdeur des procédures administratives[486]. Puis la France eut recours à des importations de matériels et matières premières depuis l'étranger et notamment d'Angleterre et des Etats-Unis. Dès le 15 août 1914 fut passé entre le gouvernement français et le gouvernement britannique un accord de non concurrence et instituant une commission franco-anglaise d'entente[487]. Le recours aux importations perdura encore durant la guerre. A la mi-1916, le taux de dépendance de la France envers le Royaume-Uni pour le benzène (pour la production de phénol, intermédiaire, avant la synthèse du trinitrophénol ou *Mélinite*) s'élevait encore à 70-80 %. L'achat à l'étranger, chez les neutres et les Alliés, ne sut suffire à pallier aux insuffisances.

---

[483] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie*. *Les Canons – Les Munitions*, *op. cit*. p. 56.

[484] *Ibid.* p. 45.

[485] Langlinay, E. « Les entreprises chimiques françaises et la Première Guerre mondiale » (p. 381-400), op. cit.

[486] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), cote B 29679. Malétra, contrat entre M. Mauclère, représentant le ministère de la Guerre d'une part et M. Trévoux, représentant des Établissements Malétra d'autre part, 5 février 1916.

[487] Archives Nationales, cote 470 AP 19, fonds Alexandre Millerand, accord franco-anglais du 15 août 1914, signé Messimy, Ministre de la Guerre, 26 août 1914.

Les capacités de production de l'industrie de l'armement française devaient être rapidement et drastiquement rehaussées. Dans un premier temps, les grandes usines existantes et déjà spécialisées dans l'armement (comme celles de Bourges, Tarbes, Puteaux, Lyon ou encore Rennes) ont pu, sous l'afflux des importantes commandes du Ministère de la Guerre et avec le concours d'autres industriels, considérablement augmenter leurs capacités de production. Mais cet existant n'était pas suffisant « *il fallait construire de toutes pièces de nouvelles usines à ajouter à celles qui existaient et les pourvoir, les unes et les autres, de machines, de matières premières, de personnel*[488] ».

Certains industriels se montrèrent réticents, persuadés que la guerre n'allait pas s'éterniser au-delà de 1915 et qu'ils auraient mille difficultés à utiliser, la paix revenue, ces installations couteuses, dysproportionnées et mal adaptées à leurs fabrications ordinaires. Un début de coordination des entreprises industrielles sous la direction de l'État fut recherché. Le 20 septembre 1914, le Ministre de la Guerre Millerand convoqua et rassembla à Bordeaux tous les industriels, grands et petits, métallurgistes ou pas, possédant matériels et machines pour tourner et travailler les métaux. La Marine et les Compagnies de chemin de fer furent aussi mises à contribution. Des groupes régionaux d'industriels, à la tête desquels les plus puissants d'entre eux dans les régions concernées, furent créés, afin de se réunir périodiquement, en présence de représentants du Comité des forges de France et de la chambre syndicale de matériel de guerre, pour résoudre collégialement les difficultés lorsqu'elles se présentaient. Il s'agissait notamment de hiérarchiser le degré d'urgence des besoins, et modifier les ordres d'urgence « *sous la pression inéluctable des évènements et des accidents de guerre* [489]» Des réquisition d'usines privées furent aussi pratiquées par l'Etat. Le 31 août 1914, le Ministère de la Guerre décida de réquisitionner l'usine de Chedde (Commune de Passy dans le département de la Haute-Savoie) sur proposition de Paul Corbin, directeur de l'usine. La notification de la réquisition eut lieu le 1er septembre 1914.

C'est ainsi qu'industries, sciences / ingénieries et gouvernement se lièrent dans une « triple hélice[490] », celle l'ADN de la guerre moderne. Une guerre totale qui devait se gagner, ou se perdre, au front comme à l'arrière.

La production des obus de calibres supérieur à 75 mm débuta au commencement de janvier 1915. Fin 1915, s'imposa la nécessité inattendue de produire des canons de 75 mm, mais aussi, avec la mise en place du front figé, et des impératifs des changements tactiques de la guerre de position, des canons, engins et projectiles d'artillerie de tranchée. Mais l'industrie française, notamment celle des poudres et explosifs, essentielle en temps de guerre, dû encore souffrir au-delà de 1914 de difficultés structurelles endémiques. En France, la production de poudres et d'explosifs fut et resta encore un monopole d'Etat. En 1914, celui des poudres était censé produire les propulseurs, notamment nitrocellulosiques, pour vectoriser des obus chargés d'explosifs, ces derniers étant produits par un autre service d'Etat alors que la confection des corps des projectiles était laissée aux soins des entreprises privées.

Au niveau politique, les commissions du Parlement et la commission de l'Armée du Sénat commencèrent à demander des comptes à Alexandre Millerand, ce qu'il dû accepter début janvier 1915[491], pratiquant pour cela des auditions des membres du service des Poudres à partir du 16 février 1915.

---

[488] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions,* op. cit. p.50.

[489] *Ibid.* p. 66.

[490] Johnson, J.A., MacLeod, R. (2006). *Frontline and Factory : Compative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914 – 1924*. Springer. p.15.

[491] Rizzo, J.L., (2013). *Alexandre Millerand, socialiste discuté, ministre contesté et président déchu (1859-1943).* Paris, L'Harmattan, p. 269.

L'un des rapporteurs le plus virulent fut sans aucun doute Henri Berenger qui souligna dans un rapport critique sur un ton acerbe les aberrations profondes, structurelles, culturelles au sein de l'industrie française incapable d'outrepasser ses cloisons habituelles pour faire face aux exigences exceptionnelles de la guerre. Produire des obus chargés d'explosifs issus d'industries privées et publiques s'approchant des demandes des armées n'avait aucun sens lorsque la production étatique des poudres ne suivit pas : voilà comment produire des obus impossibles à tirer ! *« La vérité n'est-elle pas plutôt que le Monopole des Poudres est resté trop souvent pendant la Guerre ce qu'il était pendant la Paix, une administration étroite, surannée, où se perpétuent de regrettables bureaucraties de routine et de moindre effort, soit dans la passation des commandes, soit dans le règlement des affaires, soit dans la conduite du personnel ?* [492]». En juillet 1915, après les offensives allemandes au chlore gazeux par vagues dérivantes d'avril 1915, l'État français créa en réponse l'Office des Produits chimiques et pharmaceutiques.

La France disposait à titre de comparaison d'une industrie chimique plus réduite, mais surtout désorganisée par rapport à l'Allemagne. Cette dernière sut aussi très rapidement organiser son industrie chimique. Le 13 août 1914, le ministère allemand de la Guerre créa l'Office des matières premières de guerre KRA (*Kriegsrohstoffabteilung*), puis dès le 30 septembre 1914, l'Office de la Chimie de Guerre, le KCA AG (*Kriegschemikalien Aktien Gesellschaft*)[493], la corporation des industriels de la chimie. L'Office était axé autour de trois alliances industrielles géantes : la BASF sur le Rhin supérieur (Ludwigshafen), Bayer associé depuis 1904 à AGFA[494] de Berlin, et l'alliance Höchst-Cassella et Kalle, situé autour de Frankfurt-am-Main. Les Allemands étaient alors maîtres d'une industrie chimique bien adaptée aux productions de guerre et assez souple pour passer rapidement d'un produit à l'autre dès que cela s'avérait impératif. Il est vrai que l'Allemagne était déjà avant la Première Guerre mondiale le numéro un mondial pour la production de colorants synthétiques, basée sur la chimie organique de l'azote. De légères modifications des procédés industriels permettaient de basculer de la synthèse des colorants à celle du TNT et autres explosifs nitroaromatiques.

Malgré tout, en France, les livraisons aux armée prirent du retard, personnels et machines-outils n'étant pas immédiatement adaptés aux productions d'armements. Il était impossible de fabriquer instantanément, avec des moyens encore en voie de création ou d'adaptation, pour quelques milliards de matériels, à la fois des obus et des canons. Au 1er janvier 1915, le Ministère de la Guerre pouvait espérer produire journellement au maximum 25 000 projectiles alors que la demande était de plus de 100 000.

---

[492] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 7. Rapport fait à la Commission de l'Armée sur les poudres et explosifs par H. Bérenger, sénateur, en mars 1916.

[493] Johnson, J.A. (2006). « Technological mobilization and munitions production : comparative perspectives on Germany and Austria » In *Frontline and Factory : Comparative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914-1924.* Edited by MacLeod, R. University of Sydney and Johnson, J.A. Villanova University. Archimedes. New studies in the history and philosophiy of science and technology. Volume 16. Springer.

[494] *Aktiengesellschaft für Anilin Fabrikation AG.*

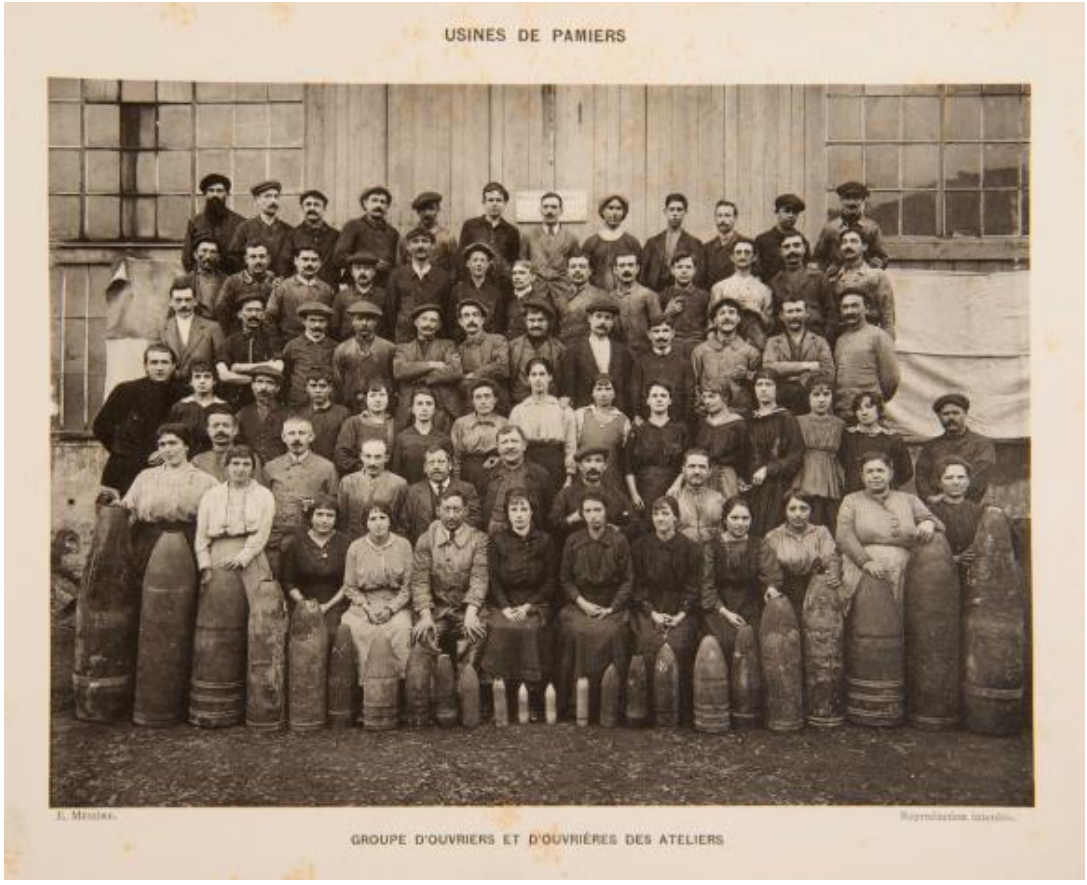


Figure 86 : Personnel d'une usine de production de munitions de Pamiers dans l'Ariège posant devant des exemplaires d'une vaste gamme de munitions de tout calibre[495].

Figure 87 : Rouleaux de fil de fer barbelé endommagé: les femmes produisent pendant la guerre des obus à la Saarbrücker = Firma Dingler & Karcher[496] (Sarrebruck, Land de Sarre, Allemagne).

[495] [pl. 21], dans Société métallurgique de l'Ariège, album de photographies imprimées (18 x 24). 1917, 80 p.

[496] Historisches Museum Saar (HMS). Saarbrücken, Allemagne. https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/saarbruecken/industriegeschichte-giesserei-dingler-und-karcher-saarbruecken-1864-1972_aid-51450881.

Les politiciens montent en ligne

Figure 88 : Le Général de division Louis Henry Auguste Baquet (1858-1923) (à gauche)[497] et le journaliste et sénateur de la Meuse (du 19 janvier 1908 au 10 janvier 1920) Charles Humbert (1866-1927) (à droite)[498].

En mars 1915, le Directeur de l'Artillerie en poste au moment de la mobilisation, Louis Henry Auguste Baquet (cf. Figure 88) se vit reproché par une sous-commission du Sénat d'avoir supprimé en novembre 1914 des commandes de canons de 75 mm de modèles spéciaux, arguant « *Au front, d'où je viens, faute de munitions, un seul canon tire dans chaque batterie*[499]*, ou bien une seule batterie sur trois reste en ligne pendant que les autres sont parquées à l'arrière ; nous avons trop de canons pour ce que nous avons d'obus*[500]. », des propos transformés et dénaturé par le virulent journaliste mais aussi homme politique et sénateur de la Meuse, Charles. Humbert (cf. Figure 88) dans son rapport « *A l'administration de la guerre, on professe que nous avons trop de canons* [501]» puis repris par la presse. « *La légende était créée*[502] ». On demanda au général Baquet « *d'opposer des mesures exceptionnelles à des circonstances exceptionnelles !* ». *« Il en était réduit à répondre qu'il était difficile de faire en quelques mois ce que l'on aurait dû faire depuis dix ans ; qu'il était impossible de fabriquer instantanément, avec les moyens encore en voie de création, pour quelques milliards de matériel, faute d'avoir dépensé un milliard en temps utile. Il devait expliquer que, même en guerre, le rendement de l'homme et de la machine ne peuvent être accrus indéfiniment*[503] ». Personne n'avait les moyens de créer en si peu de temps une telle capacité de production pour subvenir aux besoins des armées. Il héritait comme technicien, artilleur, pragmatique et conscient des réalités du terrain, du fardeau de près de 40 ans d'inertie de l'armée qui conduisit son artillerie, trop statique, dans l'ombre de l'infanterie / cavalerie placées sous les feux de la rampe des offensives à outrance.

---

[497] Louis Henry Auguste Baquet - notice nécrologique dans Matot-Braine de 1924. https://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Henry_Auguste_Baquet#/media/Fichier:Louis_Baquet_Matot-braine.jpg

[498] Bibliothèque nationale de France. French politician Charles Humbert (1866-1927). Agence de presse Meurisse.

[499] Compagnie d'artillerie de campagne composée de 4 canons de 75 et de tout ce qui est nécessaire pour servir ces canons,

[500] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions,* op. cit. p. 61.

[501] *Ibid.*

[502] *Ibid.*

[503] *Ibid,* p. 60.

La campagne « *Des canons, des munitions* » initiée et attisée par Charles Humbert n'aboutit pas uniquement à déconsidérer le général Baquet dans l'esprit de ses concitoyens, comme l'auteur responsable de la situation fragile de l'armement, mais elle eut aussi une influence néfaste sur le moral des armées en campagne. Les combattants, croyant que la guerre était devenue une affaire de matériel exclusivement se sentirent comme abandonnés. Malgré l'appui et la bienveillance du Ministre de la Guerre, Alexandre Millerand, le général Baquet dut quitter la direction de l'artillerie le 20 mai 1915. La direction fut alors érigée en sous-secrétariat d'Etat à l'Artillerie et à l'équipement militaire avec à sa tête non plus un artilleur et technicien de la guerre, mais un politicien, Albert Thomas (1878-1932)[504], pour une autre guerre, intérieure, « *pour résister aux assauts politiques*[505] » de cette période de crise. Confié par le cabinet Viviani du 26 août 1914, conserva ce même portefeuille dans le cabinet Briand du 29 octobre 1915.

3.1.6 La fin de la guerre de mouvement et la cristallisation du front d'une guerre de position

A la guerre, il est essentiel d'avancer, mais il est primordial de ne pas reculer. Dès la fin de l'année 1914, les deux camps abandonnèrent l'idée fatale des charges d'infanterie et de cavalerie frontales sur un ennemi puissamment armé et améliorèrent les premières tranchées et fortifications de circonstance du début des combats pour se protéger de l'ennemi et de l'hiver 1914-1915. Ces retranchements qui devaient initialement être provisoires allaient perdurer. Les armées adoptèrent une posture statique par le renoncement à l'offensive et la recherche du salut par la défensive. C'est ainsi que le front se figea « au point mort » sur une ligne quasi-statique serpentant sur environ 750 km entre le « kilomètre 0 » sur la frontière franco-suisse (Ferrette) au sud à la mer du Nord (Nieuport) au nord. Ce front s'installa du nord au sud, dans des environnements géologiques et géographiques d'une grande diversité, entre les dunes de la mer du Nord, les plaines crayeuses puis argileuses du Pas-de-Calais, crayeuse si blanches de la Picardie et de la Champagne, puis des hauts calcaires et gréseux des Hauts-de-Meuse et de l'Argonne, en passant par les montagnes granitiques et métamorphiques des Vosges, pour finir dans les collines molassiques du Sundgau[506].

C'était l'enlisement et le début de la guerre des tranchées, de position (ou de siège) qui allait caractériser la physionomie de la guerre les trois années qui suivirent.

---

[504] Ministre de l'Armement et des Fabrications de Guerre du 12 décembre 1916 au 12 septembre 1917 qui coordonne la production nécessaire à l'armée française.

[505] Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions, op. cit*. p. 15.

[506] D. Hubé (2017). *1914-1918 Tremblements de guerre*, *op. cit*. p. 30.

3.2. 1915. L'IMPASSE D'UNE ANNEE TERRIBLE

« La défense qui débute après le point culminant de l'attaque […] est infectée par l'esprit de l'offensive[507] ».

3.2.1 Tentatives pour desserrer l'étau et briser la muraille allemande

L'année 1915 fut celle des tentatives de reprendre la guerre de mouvement et de desserrer l'étau d'un front figé depuis l'hiver 1914-1915. Pour le GQG il ne fallait surtout pas s'enliser, ses capacités de mouvement faisaient sa force, alors qu'en face l'armée allemande s'apprêtait, en fortifiant ses positions, à livrer une guerre inscrite dans la durée. Les Français refusèrent la fatalité de la guerre engluée et aménagèrent sommairement leur tranchées, sensées n'être que des abris de fortune et provisoires. En face, les Allemands fortifièrent leurs retranchements, en faisant appel notamment au béton. « *Ce conflit a été soutenu, en permanence, par l'idée que la prochaine offensive serait la bonne. Personne ne s'est vraiment installé pour durer […]*[508] ». Pour arriver à leurs fins, les Français optèrent sur une double stratégie, celle de l'usure d'une part (symbolisée par la célèbre formule de Joffre « *Je les grignote* ») et de la rupture d'autre part[509]. L'accumulation d'énormes moyens d'artillerie, d'hommes et de matériel en un point donné choisi par avance, le franchissement des tranchées et l'occupation des arrières lignes ne sauraient suffire à une rupture décisive du front. La percée du front et des lignes de retranchement adverses devint « *une entité suprême et comme divine*[510] ». Les généraux s'hypnotisèrent sur la percée, « *sur le bris de la grande muraille allemande qui court de la mer du Nord à la Suisse. Une fois que la ligne ennemie sera enfoncée, à un endroit donné, il suffira de s'engouffrer dans la brèche pour que le front craque et que l'ennemi se replie de partout… [511]*». Cette percée décisive ne pouvait être opérée que si des conditions et circonstances favorables étaient réunies. Le colonel Pétain comprit en 1915, qu'elles devaient être créées et imposées à l'ennemi. Sa stratégie était celle de l'usure sur tout le front par des opérations limitées en profondeur. C'est alors que les zone de faiblesses et les secteurs les plus favorables se dévoileraient, sur lesquelles les grands assauts pouvaient être dirigés en misant sur l'effet de surprise et la célérité. C'est ainsi que s'articulait la stratégie entre usure et rupture.

Il convient d'abord de distinguer le « grignotage » d'usure, c'est à dire les opérations d'intérêt local (Vosges, Argonne, les Eparges, etc.), et les grandes offensives de rupture du printemps et de l'automne en Artois et en Champagne, qui reposèrent sur une analyse stratégique et répondaient à des priorités à l'échelle du théâtre d'opérations[512].

---

[507] Bardiès, L. (2023). « *Guerre et « point ne culminant de la victoire » Clausewitz en Ukraine ». Défense & Sécurité Internationale* n° 164, mars-avril 2023.

[508] Entretien avec Gerd Krumeich « *Il y a eu jusqu'au bout, un tel aveuglement*… » La Première Guerre mondiale. 2e partie. 1914-1918. Au cœur des grandes batailles. GEO Histoire n°13. p. 26

[509] Becker, J.J., Krumeich, G. (2012). *La Grande Guerre. Une histoire franco-allemande*. Texto. Editions Tallandier.p.213.

510 De Gaulle, C. (1944). *Le Fil de l'Epée*, *op. cit*. p. 113.

[511] Le Naour, J. Y. (2018). *« Je les grignote », disait Joffre* , In *1914-1918. L'intégrale*, sous la direction de LE Naour Jean-Yves. Paris, Perrin, « Hors collection », 2018, p. 323-348. URL : https://www.cairn.info/1914-1918--9782262076542-page-323.htm

[512] Porte, Lieutenant Colonel. (2016). Archives de la Défense. *Les offensives de 1915. Nécessité stratégique ou doctrine irresponsable ?*

3.2.2 Les grandes offensives du printemps

Les Allemands se battaient à ce moment-là sur deux fronts contre les alliés de l'Entente. Pour tenter de soulager la pression sur les Russes et le front de l'est, en attirant le maximum de troupes allemandes vers l'ouest, Français et Britanniques lancèrent assauts sur assauts dès le début de l'année 1915, en Champagne, le 16 février 1915, puis en Artois (Neuve-Chapelle, bataille d'Armentières, dans le Pas-de-Calais, 10 au 12 mars 1915).

Attaquer en Artois et en Champagne pourrait (i) restaurer la guerre de mouvement sur laquelle misèrent Français et leur allié britannique et, a minima, menacer les axes de communication des Allemands tout en les contraignant à se replier largement du territoire national[513]. Les combats engagés dès octobre 1914 se poursuivirent début 1915 en Argonne (pour appuyer l'aile droite de l'armée française engagée en Champagne) où la barrière naturelle formée par l'association du relief et de la forêt joua son rôle. Les Allemands progressèrent vers le sud, côté lorrain à l'est, tandis que les Français s'avancèrent vers le nord, côté champenois. Les deux armées marchèrent à quelques kilomètres les unes des autres, à l'opposé, mues par une volonté commune de se surprendre sans toutefois pénétrer l'inextricable massif forestier[514]. La tentative de percée française sur un large front ouest-est de près de 25 km, entre Auberive à l'ouest et Massiges à l'est, fut un échec et la première bataille de Champagne se termina le 20 mars 1915.

3.2.3 La seconde bataille d'Ypres (avril-mai 1915) et l'inauguration de l'usage massif de l'arme chimique

Les Allemands tentèrent aussi, par un ensemble de quatre offensives, plus connues sous le nom de « Seconde bataille d'Ypres », de se saisir de la ville d'Ypres tenue par les franco-britanniques (canadiens), entre avril et mai 1915. Cet épisode de la Première Guerre mondiale est resté tristement célèbre par l'usage, par les Allemands, pour la toute première fois, de l'arme chimique à grande échelle lors de l'offensive du 22 avril 1915 à Langemark.

Cette attaque par vagues dérivantes de dichlore (Cl_2) surprit les Alliés qui furent contraints au recul. Mais les Allemands ne surent tirer profit de leur avancée et retrouvèrent leurs positions initiales suite aux contre-offensives alliées. Les Alliés saisirent l'opportunité pour espérer une rupture du front occidental en lançant ailleurs une vaste offensive. Ils focalisèrent leurs efforts sur deux secteurs. Ce fut d'abord l'Artois (« troisième bataille d'Artois ») pour la conquête des hauteurs des crêtes de Vimy (*Vimy Ridge*), d'Aubert (*Aubert Ridge*) et Festubert (*Festubert Ridge*) entre mars et décembre 1915. Les Français attaquèrent à Arras, Vimy, Notre-Dame-de-Lorette, tandis que les Britanniques, comptant beaucoup de Canadiens dans leurs rangs, montèrent à l'assaut des hauteurs d'Aubert et Festubert. Malgré l'engagement de 400 canons et le pilonnage des positions allemandes, les défenses ne cédèrent pas. À Aubert, les troupes allemandes reculèrent pour se mettre hors de portée des canons. L'infanterie allemande était intacte au moment où les Alliés s'élancèrent hors des tranchées. Les Britanniques lancèrent aussi une offensive en septembre 1915 en direction de Loos-en-Gohelle qui fut un échec du fait des pénuries en obus, de difficultés d'approvisionnement logistique et d'une attaque chimique par vague dérivante qui se retourna avec les vents contre leur propre camp. Le soldat C.H. Russell du régiment écossais de Londres, s'exprima, au sujet de la bataille de Loos, en ces termes : « *On nous avait dit que ce serait du gâteau, que la prise de ces tranchées, une fois pulvérisées par nos canons, ne serait qu'une balade de santé*[515] ». Cruelles désillusions.

---

[513] Porte, Lieutenant-Colonel. (2016). *op. cit*.

[514] Amat, J.P. (2015). *Les Forêts de la Grande Guerre. Histoire, mémoire, patrimoine*. Presse de l'université Paris – Sorbonne. p. 213.

[515] Grant, R. G. (2013). « Les batailles de l'Artois », In *1914-1918. L'Encyclopédie de la Grande Guerre*, *op. cit*. p. 143.

3.2.4 La seconde bataille de Champagne (septembre 1915)

Le second secteur très actif du front fut à nouveau celui de la Champagne. La « seconde bataille de Champagne » fut engagée du 25 au 30 septembre 1915 sur un front ouest-est, s'étendant de l'est de Reims à l'ouest à l'Argonne à l'est. Elle visait à percer le front avant que les conditions climatiques ne se dégradent avec la venue de l'hiver. Minutieusement préparée, la bataille tourna à l'avantage des Français qui prirent plusieurs lignes de tranchées. Les Allemands se ressaisirent et concentrèrent des renforts sur les points névralgiques où le front semblât être prêt à céder. Puis voyant les Français sur leur posture offensive, hors de leurs défenses, ils lancèrent une violente contre-offensive et finirent par reprendre l'ensemble des terrains initialement perdus. Piètre résultat pour un prix cher : 145 000 Français et 95 000 Allemands vinrent allonger la liste des morts. En Artois comme en Champagne, les offensives furent vaines.

3.2.5 Des combats locaux d'usure très meurtriers

Champ de bataille des Vosges. La guerre en montagne

Plus à l'est, dans les Vosges, seul secteur du front occidental où se déroula une guerre en montagne, 1915 resta gravée dans l'Histoire comme l'année meurtrière. Les combattants s'y replièrent en septembre 1914 « *Nous sommes là pour surveiller ces défenses naturelles*[516] » écrivit l'écrivain combattant Gabriel Chevalier dans son récit *La Peur*. Les Allemands y défendaient, sur les crêtes des ballons des Vosges, leurs frontières. Du 20 juillet au 16 octobre 1915, la bataille du Linge opposa l'armée française à l'armée allemande. Elle eut pour cadre le massif du Linge situé sur le ban des communes de Hohrod, Soultzeren et Orbey dans le département du Haut-Rhin, entre 800 et 1 000 mètres d'altitude. Cette bataille s'inscrivit dans une série de combats dans les Vosges déclenchée par l'armée française afin d'obtenir des positions dominantes pour une attaque future plus à l'est, dans la plaine d'Alsace. Les affrontements se soldèrent par plus de 17 000 pertes dont 10 000 Français.

Figure 89 : Sentinelle dans les Vosges luttant contre un ennemi implacable, le froid[517].

Les chasseurs alpins y adaptèrent les techniques de combat aux reliefs et aux conditions climatiques de la montagne, en faisant appel au ski pour charger, aux chiens de traîneau pour déplacer les troupes et le matériel et à l'artillerie de tranchée pour vectoriser des engins au-dessus des reliefs et cimes des arbres. Plus au sud se dressait l'Hartmannswillerkopf (HWK) dominant la plaine d'Alsace. Entre le 19 janvier et le 22 décembre 1915 d'âpres combats s'y déroulèrent se soldant par plus de 25 000 morts dont la majorité de Français. Cette hécatombe vaudra à l'HWK, le « Vieil Armand », parmi les Poilus, le terrible surnom de « Montagne mangeuse d'hommes ».

---

[516] Chevallier, G. (1930). « La Peur » In *1914-1918. Français et Allemands dans les tranchées*. Librairie Générale Française, 2013. p. 889.

[517] Dernières Nouvelles d'Alsace. https://cdn-s-www.dna.fr/images/55136FBB-60DD-4A17-B155-5F7DF0DCD9AA/NW_raw/une-sentinelle-dans-les-vosges-a-son-poste-de-tir-1504595294.jpg

Les Allemands s'y fortifièrent en attaquant le granite pour s'abriter. D'autres combats se déroulèrent le long de la ligne des crêtes comme à la Tête des Faux, au Violu, à La Fontenelle, ou encore, sur le versant lorrain, à La Chipote, au Ban-de-Sapt (la Roche de la Mère Henry) et au col de La Chapelotte. Pour les Etats-Majors, le front des Vosges resta secondaire et non prioritaire, en terme d'effectifs et d'approvisionnement en matériel et munitions. Le relief et l'indéniable supériorité de l'artillerie allemande ne permettaient plus au GQG d'espérer déborder les lignes allemandes par des attaques brusques sans une importante augmentation des moyens humains et matériels et l'acceptation de grandes pertes en vies humaines.

Les batailles pour la possession des hauteurs. Les Eparges, Vauquois (Meuse)

La bataille des Éparges, (ou bataille de Combres pour les Allemands), fut une série de combats pour la maîtrise de la crête des Éparges opposant Français et Allemands du 17 février au 5 avril 1915. Aux Eparges, comme plus au nord, en Argonne et à Vauquois, les combats, bien que localisés, furent toutefois particulièrement violents pour la prise de possession et la maitrise des hauteurs, des observatoires particulièrement prisés pour diriger efficacement les tirs de l'artillerie. La butte des Eparges est située en Meuse, sur la face nord du saillant allemand de Saint-Mihiel et s'avance vers le nord-est dans la plaine de Woëvre où stationnaient les troupes allemandes. Les tactiques employées couplaient des assauts de l'infanterie (en pleine pente), appuyés par l'artillerie, après l'explosion (préparatoire) de fourneaux de mine offensifs (se traduisant par la destruction de la surface au-dessus du point de détonation et l'ouverture de vastes entonnoirs (cf. Section 3h du présent manuscrit). En février, mars puis avril 1915, les offensives et contre-offensives se succédèrent dans des conditions météorologiques très éprouvantes, sans que l'une ou l'autre des parties prenne l'ascendant. A l'issue des combats d'avril 1915, pour les deux camps, les Français occupèrent la grande majorité de la butte sans qu'il leur fut possible d'y installer des postes d'artillerie, objet de la bataille. Les trois mois d'affrontement mirent hors de combat dans les deux camps 12 000 hommes (tués, blessés et disparus). Dès lors et jusqu'en avril 1917, comme à Vauquois après l'échec des assauts français de 1915, les combats de guerre de position s'opérèrent sous terre dans la lithosphère avec la guerre de mines. 46 mines allemandes et 32 mines françaises explosèrent aux Eparges sur une longueur de front de 800 mètres sans modifier la ligne de front mais en transformant la physionomie de la butte. Plus de 500 explosions souterraines modifièrent définitivement la topographie de la butte de Vauquois.

3.2.6 L'arme économique. Le blocus maritime britannique

En 1915, deux évènements marquèrent aussi d'une pierre angulaire l'histoire de la Grande Guerre. C'était d'abord le choix fait par les Alliés de l'usage de l'arme économique, prenant la forme du blocus illimité sur mer et sur terre des importations et exportations allemandes, pour étouffer la machinerie industrialo-militaire adverse. La bataille du Dogger Bank en Mer du Nord (le 24 janvier 1915) signa l'arrêt de mort de l'ambitieux projet allemand d'avant-guerre de maîtriser les mers par sa moderne *Hochseeflotte* (flotte de haute mer). La *Royal Navy* (et sa *Great Fleet*) régnait sur les mers et océans du globe. Le 11 mars 1915, le *British Order in Council* étendit systématiquement une stratégie menée dans les faits depuis août 1914[518]: il s'agissait d'empêcher toutes les marchandises d'entrer et de sortir d'Allemagne et des puissances centrales. L'Allemagne fut ainsi privée de ressources stratégiques pour conduire son effort de guerre et en particulier de ses sources en azote provenant du Chili, indispensables alors pour produire de l'acide nitrique, et donc des poudres et des explosifs.

[518] Forcade, O. (2021). « *Le blocus en 1914-1918 ». Histoire et historiographie. Les Cahiers Sirice*, vol. 26, no. 1. pp. 5 - 21.

Le blocus allié concourut sans conteste à la victoire de 1918. L'Allemagne chercha à contourner le blocus par le commerce de réexportation et la contrebande via les pays neutres et, en représailles, organisa et mit en œuvre en mer du Nord, dans la Manche et l'Atlantique, une guerre sous-marine. Le 4 février 1915, l'Allemagne déclara zone de guerre les eaux anglaises et autorisa la destruction de tous les navires qui s'y trouveraient. Le 7 mai 1915, le sous-marin U-20 (*Unterseeboot 20)* expédia par le fond le moderne transatlantique *Lusitania*, sous pavillon américain, et quelque 1 200 passagers, lors de son trajet entre New York et Liverpool. Incident non anodin sur le plan géopolitique qui aurait pu se limiter aux colonnes de la presse sous les rubriques « faits divers ». Ce torpillage participa aux motifs avancés par le président Wilson, plus tard en 1917, pour persuader le Conseil de rompre la neutralité des Etats-Unis et d'engager le pays dans une guerre européenne outre-mer non désirée par les Américains. Le blocus illimité reçut officiellement le concours des États-Unis à leur entrée en guerre le 6 avril 1917, réponse à la guerre sous-marine allemande à outrance commencée le 1er février 1917.

3.2.7 Echec de la percée et durcissement défensif

Les projets allemands et alliés de rompre le front et de reprendre au plus vite la guerre de mouvement se soldèrent donc par un échec, avec une ligne de front de l'hiver 1914-1915 quasiment inchangée.

Le bilan humain de l'année était dramatique : près de 350 000 tués et un million de blessés et malades évacués pour quelques centaines de mètres d'avancée[519]. La guerre devint alors « une guerre de mouvement immobile » sur une ligne de front quasi statique, tout juste secouée de soubresauts lors des assauts, et agitée d'incessants « micromouvements[520] ».

La carte de la Figure 90 de la page suivante, positionne le front occidental stabilisé des années 1915 et 1916.

[519] Porte, Lieutenant-Colonel (2016). *Les offensives de 1915. Nécessité stratégique ou doctrine irresponsable ? op. cit.*

[520] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle. 1914-1918*. Collection tempus. Perrin. p. 263.

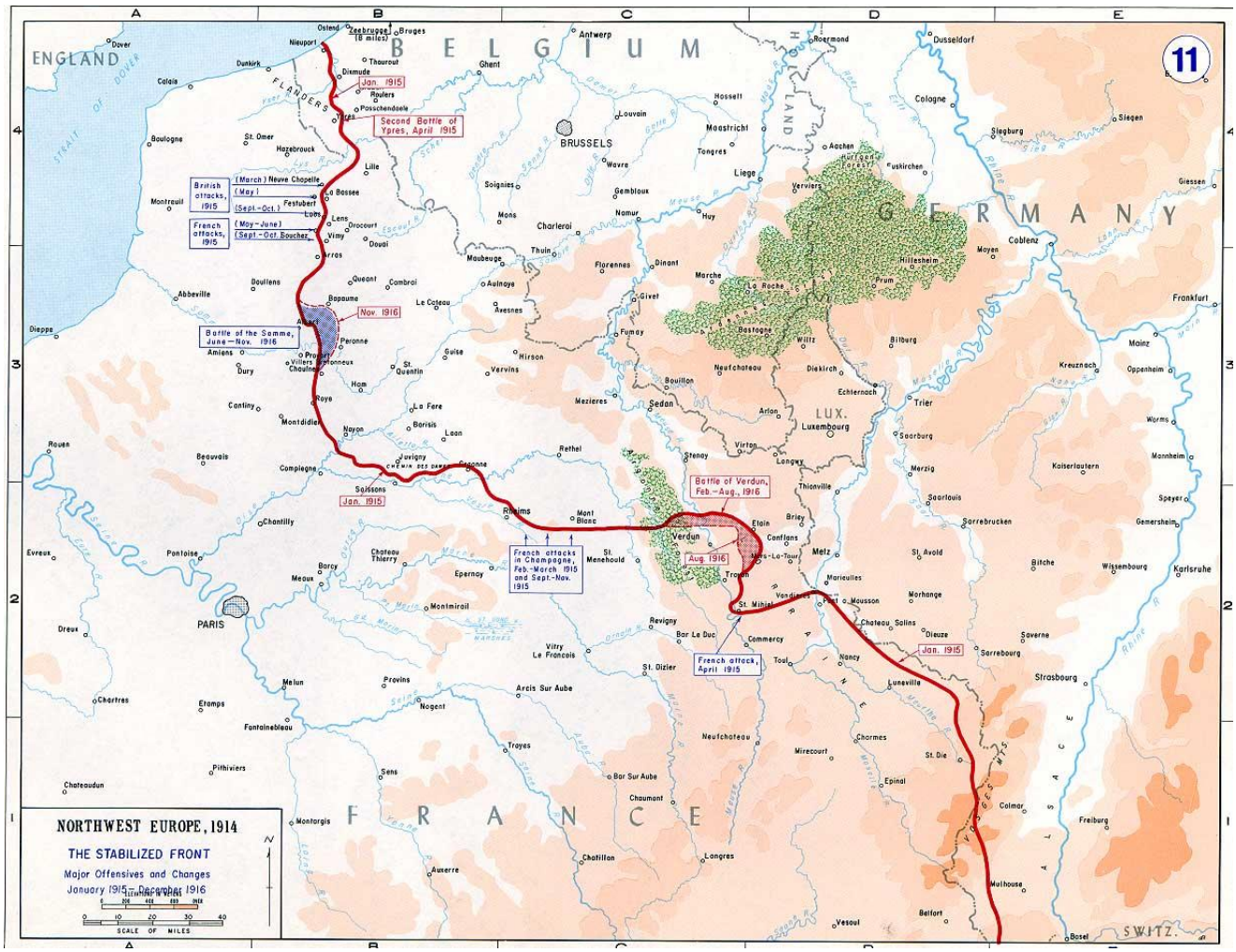


Figure 90 : Position du front occidental fin 1914[521].

3.3. 1916. L'INVENTION ET L'AFFIRMATION DES « HYPERBATAILLES[522] »

L'année 1915 fut particulièrement meurtrière et se termina avec l'amer constat que les nouvelles tactiques, notamment interarmes, étaient inopérantes, les gains de terrain infimes au prix de lourdes pertes. Les armes et le matériel tenaient le front avec leur puissance de feu et leur potentiel d'attrition dans une guerre devenue « *une guerre d'hommes et de machines*[523] ».

L'année 1916, n'apporta aucune innovation tactique majeure dans la guerre ; elle fut marquée par l'exacerbation des engagements militaires et des moyens alloués, et fit dans nos représentations de cette guerre une boucherie. Les batailles de 1916, celles de Verdun et de la Somme, cristallisèrent sur elles toutes l'ignominie de la Grande Guerre, leurs magnitudes, les moyens déployés en firent des paroxysmes de la violence guerrière puis leurs anniversaires, des moments d'incitation mémorielle. Un saut d'échelle dans la violence fut franchi en février 1916.

---

521 The History Department of the US Military Academy West Point.

522 Cochet, F. (2018). La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle, *op. cit*.

523 Lafon, A., Miège, C. (2014). *Une guerre d'hommes et de machines. Désiré Sic. Un photographe du génie 1914-1918*. Editions Privat. Destins de la Grande Guerre.

Cette « hyperviolence » n'aurait pas eu lieux sans les crises au sein de l'armée allemande. L'année 1916 enterra la vision stratégique et les plans de guerre, leur préférant des buts tactiques et des plans de bataille. Un saut d'échelle concernant l'usage des moyens de l'artillerie se produisit alors « *Si l'accumulation de pièces était déjà dans l'air du temps lors des offensives de Champagne de septembre 1915, l'échelle change désormais de manière radicale*[524] ».

3.3.1 Verdun. « Ce fut aussi une manière de duel devant l'Univers, une lutte singulière[525] »

« Ich, Wilhelm, sehe das deutsche Vaterland gezwungen zur Offensive uberzugehen[526] »

Les Allemands résistèrent en 1915 aux assauts franco-britanniques au prix de lourdes pertes. L'OHL se persuada alors que les Français avaient fournis en 1914 et 1915 leur effort maximal et que leurs armées étaient, faute de réserves, au bord du précipice. S'installa une vision politique biaisée du conflit. L'ennemi était avant tout la Grande Bretagne et la Russie. Sortir la France de la guerre c'était déséquilibrer l'Entente et *in fine* pouvoir en finir avec les deux Empires.

Paradoxalement, les Allemands n'étaient pas malgré cela en position de force. Ses perspectives de gagner rapidement la guerre s'éloignèrent avec d'une part le blocus britannique sur les mers et le délitement des armées de son principal allié, l'Autriche-Hongrie, que l'Allemagne devait soutenir sur de nouveaux et multiples fronts. Le temps ne jouait pas en la faveur de l'Allemagne. Von Falkenhayn imaginait profiter de cette position pour obtenir par le canal diplomatique une paix favorable et séparée.

Mais cette stratégie ne fut pas suivie; il visait d'arriver à ses fins par la voie des armes. Une offensive limitée, puissante, loin du front stratégique ouvrant la voie vers Paris, fut imaginée afin d'y attirer les troupes françaises pour les épuiser et obtenir leur reddition. Le choix se porta sur la place forte historique de Verdun, préférée sur le plan logistique et symbolique à celle, plus au sud, de Belfort.

Les conditions géographiques (vallonnement qui permet de cacher ses pièces d'artillerie, présence de la Meuse) et des facilités de communication, avec notamment les garnisons de Metz en base arrière[527] étaient favorables à une offensive allemande efficace par des moyens limités. La configuration du front en saillant mettait aussi l'artillerie allemande en position de force car permettait de prendre les Français en tenaille par des tirs de flanc.

Les Allemands savaient ce saillant français, mal défendu et difficile à ravitailler par l'arrière par une seule route, celle de Bar-le-Duc. Si Verdun devait tomber sous l'effet d'un coup de boutoir brutal des Allemands les Français n'auraient eu plus « *d'obstacles à opposer à une avance sur Paris*[528] ». Pour les Allemands, attaquer Verdun c'était aussi compromettre le projet allié de grande offensive franco-britannique sur la Somme dont les Allemands étaient informés.

---

[524] Lafon, A., Miège, C. (2014). *Une guerre d'hommes et de machines*, *op. cit*. p. 267.

[525] Valéry, P. (1935). *Œuvres de Paul Valéry*. Éditions de la N.R.F., 1935 (5, p. 46-84). *Réponse aux remerciements du Maréchal Pétain à l'Académie Française*. Discours prononcé le 22 Janvier 1931.

[526] « Je vois la patrie allemande contrainte de passer à l'offensive ». Extrait de la proclamation du Kronprinz du 14 février aux troupes qui allaient lancer l'assaut le 21 février 1916 livré par trois déserteurs alsaciens. Louis Madelin, L. (1916). « *Devant Verdun - L'Aveu allemand », Revue des Deux Mondes*, 6e période, tome 33, 1916 (p. 873-909).

[527] Cochet, F. (2006). *1916-2006, Verdun sous le regard du monde*. Soteca. p. 225.

[528] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit*. p.266.

L'offensive fut menée par le *Kronprinz* impérial, fils de l'empereur Guillaume II, à la tête de la Ve Armée allemande. Ambitieux, il rêvait d'une place au soleil parmi les grands et de gloire, politique. Le *Kronprinz* promit, plein d'espérance, devant ses hommes « *L'Empereur alors viendra passer une Festparade sur la place d'armes de Verdun et la paix sera signée.* » Il s'était fait de la prise de Verdun dès 1914 (et la bataille de la Woëvre), une affaire personnelle.

Un nouveau seuil concernant l'usage des moyens de l'artillerie fut alors franchi « *Si l'accumulation de pièces était déjà dans l'air du temps lors des offensives de Champagne de septembre 1915, l'échelle change désormais de manière radicale*[529] ».

L'offensive (opération *Gericht*, littéralement « Jugement ») fut d'abord une réussite. Le 21 février 1916, à 4 h 15 du matin un canon de marine allemand de calibre 381 mm « 38 SLK 45 » baptisé *Langer Max,* d'une portée de 45 kilomètres, tira depuis sa plateforme de Duzey dans le canton de Spincourt (dans la Woëvre à 20 kilomètres au nord-est de Verdun), dans une effroyable gerbe de feu, son projectile de 750 kilogrammes sur Verdun. Il s'agissait du premier obus tiré, donnant le signal de l'offensive de la bataille de Verdun, l'une des plus grandes batailles jamais dominée par l'usage de l'Artillerie[530]. Le secteur de Spincourt, accueillit alors l'une des plus fortes densités de pièces d'artillerie de tout le front occidental, pour pilonner Verdun et le champ de bataille. 7 h 15 du matin : résonance spéciale de l'air. D'abord vague rumeur, elle se commua en fureur. Se levèrent les rideaux de terre et de fumées, tour à tour barrant l'horizon, telles des vagues et geysers, le sol en mouvance bouillonna. S'écrasait sur le sol et les hommes qu'il abritait, le *Trommelfeuer* (littéralement « le feu roulant »), une formidable grêle métallurgique de deux millions d'obus tirés par 1 200 canons de tous calibres[531], depuis le 420 mm jusqu'au 210 mm, en passant par le Long Max et le 305 mm autrichien. Un million de projectiles auraient été vectorisés en cinq heures. Les Poilus retranchés à 150 kilomètres dans les Vosges entendirent le grondement sourd des explosions de la « Mère des batailles ».

La densité du tir était extraordinaire durant la bataille de Verdun. Les aviateurs français qui survolèrent la Forêt de Spincourt pour la reconnaissance « *s'accordent à dire que cette région est le centre d'un véritable feu d'artifice. Le petit bois de Gremilly, au Nord de la Jumelle [ndlr : Jumelle d'Orme]. accuse une telle densité d'ouvertures de feu que les observateurs en avions renoncent à pointer sur leurs cartes les batteries qu'ils voient en action*[532] ».

Les aviateurs ne distinguaient plus le sol, caché par un épais nuage de fumée transpercé de lueurs. Les massifs forestiers visés disparaissaient, remplacés par un décor lunaire. Sur les quelques 200 km^2 du champ de bataille, les Allemands tirèrent 34 millions de projectiles ; en réponse, les Français expédièrent 26 millions d'engins, sur une période entre février et août 1916. Du 29 février au 1er mai après l'avancée allemande, face à une résistance farouche des Français, la bataille se stabilisa.

---

[529] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit*., p. 267.

[530] Mosier, J. (2001). *The Myth of the Great War: A New Military History Of World War 1.* Harper Editot. ISBN 13 : 9780060084332

[531] Ces quantités couramment avancées pour décrire l'intensité du feu roulant du 21 février 1916 apparaissent dans les faits peu probables. Il s'agissait essentiellement de pièces d'artillerie lourde capable de vectoriser des projectiles à plusieurs dizaines de kilomètres. 2 000 000 d'obus tirés par 1 200 pièces représentent en moyenne plus d'un tir par minute. Ceci n'est pas compatible avec les cadences de tir des pièces lourdes et les temps de refroidissement des tubes. Des spécialistes de l'artillerie (comme le général Guy François) précisent que les pièces déployées par les Allemands pour assurer ce tir, le total de projectiles tirés ne peut dépasser les 350 000 coups. Communication personnelle, Nicolas Czubak, Mémorial de Verdun.

[532] Bibliothèque Nationale de France. *Bulletin des armées, récit du 26 mars. La Grande guerre du XXe siècle. 1917/02.*

Cette bataille qui se voulait économe en moyens et en vie se commua en bataille d'attrition et d'usure (*Ermattungenstrategie*) conséquence d'une crise profonde au sein du commandement allemand. A l'instar de Von Kluck en août 1914, magnétisé par les succès allemands, qui se détourna des lignes directrices stratégiques du plan Schlieffen, pour voler vers un succès tactique en détruisant l'armée française, le *Kronprinz* confondit à son tour stratégie / plan de guerre et tactique / plan de bataille. Ne voulant pas adhérer, ou n'ayant pas compris les ordres, il n'appliqua pas les consignes de Von Falkenhayn, préférant un coup de poker puissant, violent et spectaculaire sur la place symbolique des Français pour les mettre à terre par une offensive décisive.

Les Français résistèrent en rive gauche et droite de la Meuse (Hauts-de-Meuse). La route Bar-le-Duc / Verdun devint ce célèbre cordon ombilical des troupes françaises engagées à Verdun, la Voie Sacrée. Le 9 avril une offensive allemande se déclencha sur les deux rives de la Meuse, suscitant le fameux mot d'ordre de Pétain *« On les aura ! »*[533] » afin de galvaniser ses troupes par un sursaut défensif du territoire français, puis la bataille se commua en une bataille d'usure. Le général Robert Nivelle remplaça le général Philippe Pétain le 29 avril 1916, appelé par Joffre à la tête du Groupe des Armées du Centre. La bataille s'atténua « *par une sorte de lâcher-prise allemand*[534] », puis glissa en faveur des Français lorsque des troupes allemandes durent être déplacées pour parer la grande offensive franco-anglaise déclenchée le 1er juillet 1916 dans la Somme. Le 20 octobre, une vaste contre-offensive fut lancée par les Français qui reprirent le fort de Douaumont et qui s'installèrent sur les terrains initialement perdus. Le limogeage de Von Falkenhayn et son remplacement par le duo Paul Von Hindenburg et Erich Ludendorff fut l'effondrement des visions stratégiques au profit des tacticiens et des plans de bataille. La bataille devait jouer par sa puissance spectaculaire « *un évènement aux propriétés quasi-magiques* » propres à créer par effets de stupeurs et de sidération le terreau propice à la résolution politique de la guerre. Cette non-stratégie était alors en phase avec la question non encore résolue au sein de l'armée allemande de l'exploitation des succès des assauts. Les Français reproduisirent ce schéma en 1917 en voulant créer l'évènement sur le Chemin des Dames. Ce fut la dernière bataille de ce type.

De ce duel acharné de près de 300 jours entre Français et Allemands, fait d'impitoyables matraquages par l'artillerie mais aussi de (rares) corps à corps pour la prises ou la reprise de tranchées et forts, pour *in fine* des gains territoriaux insignifiants, en sortirent deux vainqueurs : l'artillerie lourde[535] et la mort[536]. La densité de morts y fut très nettement supérieure à celle de la Somme vue l'étroitesse du champ de bataille.

La bataille de Verdun fut une bataille totale, par le matériel, par l'engagement physique et moral des combattants. Verdun resta la grande bataille (défensive) de l'armée française qui fit face et déjoua toute seule les velléités offensives allemandes. 75% des combattants français de la Grande Guerre passèrent à Verdun suite au système de relève (« tourniquet ») instauré par Pétain pour ne pas épuiser ses hommes, qui permit à grand nombre « *de se l'approprier dans le registre mémoriel*[537] ».

---

[533] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle, op. cit*., p. 268.

[534] Audoin-Rouzeau, S, Krumeich, G. (2008). *Combattre*, *op. cit*. p. 504.

[535] Les artillerie françaises et allemandes disposaient dès fin février 1916 s'équilibrèrent en matière de pièces lourdes avaient de part et d'autres environ 500 unités.

[536] 700 000 pertes (morts, disparus ou blessés). 362 000 soldats français et 337 000 allemands, une moyenne de 70 000 victimes pour chacun des dix mois de la bataille.

[537] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit*., p. 273.

La bataille de Verdun mit en lumière d'une façon brutale la puissance de l'Artillerie et son rôle de prime importance dans la conduite tactique d'une bataille. La contre-préparation d'artillerie et les tirs d'interdiction pratiqués par les pièces lourdes à longues portées désorganisèrent les attaques, infligeant in fine plus de pertes et de dégâts que les tirs de barrage alors de règle. L'autre enseignement de la bataille de Verdun fut celui de la nécessité d'une densité de feu absolument considérable pour obtenir des actions militaires au sol réellement efficaces[538]. Pourtant, elles ne furent pas décisives. Les combattants tenaient le front.

3.3.2 Le *Big Push*[539] sur la Somme

> *« Ce que nous avions connu jusqu'à présent, sans d'ailleurs le savoir, c'était la tentative de gagner la guerre par des batailles rangées d'anciens style et l'enlisement de tentatives dans la guerre de positions. Maintenant, c'était la bataille de matériel qui nous attendait, avec son déploiement de moyens titanesques[540] ».*

Les Alliés voulaient dès fin 1915 rompre le front plus au nord, en Picardie, pour forcer les Allemands au repli. Le 1er juillet 1916 resta gravé de lettres de sang dans l'histoire militaire de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. La bataille de la Somme fut engagée ce jour-là dans le secteur de Péronne, Albert, principalement par les Britanniques, peu expérimentés, alors que les Français devaient tenir en Lorraine, à Verdun. Les Français y prirent part avec leurs Xe et IXe Armées sur leur flanc droit, en Champagne, aidés en cela par le corps expéditionnaire russe. Sur la Somme, les explosions de mines souterraines sous les tranchées allemandes et la préparation d'artillerie d'une semaine des Britanniques, bien que d'une extrême violence, furent d'une efficacité limitée. Les Allemands s'étaient bien terrés, protégés par leurs abris en béton. Le 1er juillet, la charge d'infanterie sur les quelques soixante kilomètres de front fut désastreuse. L'Artillerie s'avéra inefficace pour couvrir les fantassins qui s'élancèrent hors des tranchées puis marchèrent alors à découvert en se jetant sur les mitrailleuses allemandes.

De juillet à septembre 1916 s'ensuivirent des combats autour de zones plus restreintes, comme à *Devil Wood*[541] où les Sud-africains et les Australiens tentèrent de s'emparer des hauteurs de Thiepval, convoitées par les deux parties. En septembre 1916, pour tenter de limiter les pertes humaines, les premiers chars britanniques furent lancés à toute « vitesse réduite[542]» dans la mêlée à Flers-Courcelette. La bataille de la Somme fut la première bataille mécanique de l'histoire. L'échec des blindés renforça les convictions allemandes sur l'inefficacité de l'arme blindée mécanique.

Les Poilus, chargés de mener les combats dans le segment sud du front de la Somme, plus aguerris que les Britanniques, furent plus heureux dans leurs initiatives et avancèrent. Les Allemands lancèrent contre-offensives sur contre-offensives pour ne pas s'exposer à une rupture du front. Pour sécuriser le front, ils créèrent jusqu'à quatre lignes de défense. C'est durant ces épisodes que les Allemands accusèrent le plus de pertes avec près de 100 000 hommes. Percer le front ? Démoraliser les Allemands ? Détruire l'armée allemande ? Les objectifs réels de cette bataille évoluèrent et restèrent imprécis pour les Alliés. Malgré les innovations techniques apportées et l'expérience acquise sur le terrain, les Alliés n'arrivèrent pas à percer les lignes allemandes. En novembre 1916, la bataille de l'Ancre fut le dernier affrontement significatif avant l'hiver.

---

538 Ortholan, H. (2020). *L'artillerie de la Grande Guerre. 1914-1918, op. cit*. p. 173.

539 Terme utilisé par la propagande britannique Philpott, W. (2009). Bloody Victory. *The sacrifice on the Somme,* Londres, Abacus. p.9.

540 Jünger, E. (1920). « *Orages d'acier* ». In *1914 -1918. Français et Allemands dans les tranchées*. Librairie générale franfaise, 2013. p. 326.

541 Une déformation anglo-saxonne de « Bois de Deville »

542 Les chars lourds britanniques Mark 1 « mâle » ou « femelle », monstres de 30 tonnes, progressaient à 7 $km.h^{-1}$.

Parmi les 60 000 soldats Canadiens, 20 000 trouvèrent la mort dans la Somme. Comme à Verdun, seul progressa le long listing du nombre de morts au combat. Le capitaine Wilfrid Mile donna jusqu'au 30 novembre 1916 le chiffre de 419 654 britanniques mis hors de combats (tués, blessés, disparus), tandis que Winston Churchill avança le chiffre de 513 279 pertes durant la seconde moitié de l'année 1916. Côté français, le nombre de victimes s'éleva à environ 200 000[543]. Les Allemands perdirent sur le front occidental environ 597 000 hommes de juillet à octobre 1916 (période durant laquelle les Allemands étaient engagés à la fois dans les batailles de Verdun et de la Somme).

3.4. 1917, L'ANNEE CHARNIERE, L'ANNEE D'ANGOISSE[544]

« C'est à Craonne, sur le plateau / qu'on doit laisser sa peau / Car nous sommes tous condamnés / Nous sommes les sacrifiés» La Chanson de Craonne[545], extrait.

3.4.1 Le repli stratégique allemand et la déconvenue française sur le Chemin des Dames

Début 1917, l'armée allemande, affaiblie par les pertes sur Verdun et la Somme, comprit qu'elle ne pouvait plus se permettre un déploiement de forces sur une large portion de front, comme elle le fit en 1916. Avant de pouvoir reprendre l'initiative à l'ouest, il lui fallait d'abord en finir avec le front oriental, face aux Russes, et y remporter des victoires. C'est ainsi que les Allemands fortifièrent sur le front ouest une ligne de position de défense profonde entre Arras au nord, Saint-Quentin et Soisson au sud : la ligne Hindenburg (*Siegfried* pour les Allemands). Les troupes de Guillaume IIs s'y replièrent en mars 1917, par un mouvement de quelque 30 à 50 kilomètres vers l'est, en saccageant sur leur route les usines, ponts, coupant les arbres fruitiers, polluant les puits par du fumier ou des obus chimiques, etc., selon leur tactique dite de « la terre brûlée » afin de ralentir et compliquer la marche des Alliés.

Ce nouvel agencement défensif des positions allemandes contraria le chef des armées françaises, le général Robert Nivelle (cf. Figure 91 ci-contre), qui avait brillé dans l'exercice de ses fonctions, en 1916 à Verdun. Pourtant stratégique, le repli allemand de mars fut présenté à l'opinion publique française comme une retraite. Il n'en était rien. Civils et Poilus, exaspérés par cette guerre engluée, voulaient en finir par une rupture du front. Nivelle décida de frapper, fort de son aura de Verdun et d'une artillerie française qui avait rattrapé son retard sur celle de l'Allemagne.

Figure 91 : Le Général Robert Nivelle à Souilly (département de la Meuse), le 9 novembre 1916[546].

Sa stratégie était de rompre le front en un point précis et par surprise, en concentrant une énorme puissance de feu en un temps réduit en reproduisant les schémas de la stratégie de rupture, que ni Verdun, ni la Somme ne surent, disqualifier.

---

543 Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit*., p. 280.

544 Palat, Barthelémy-Edmond, général (1927). *L'Année d'angoisse 1917,* Paris, Berger-Levrault, p. 653.

545 Reprise d'une complainte sans doute apparue à Notre-Dame de Lorette à la fin de l'année 1914 et adaptée ensuite à différentes batailles.

546 La Contemporaine, référence B4352.

Mais sur le Chemin des Dames, les troupes allemandes, avaient leur moral au plus haut, galvanisées par leur succès sur le front de l'est. La perspective d'une proche victoire devenait une réalité. Nivelle espérait prendre en tenaille les Allemands dans le nord de la France en les attaquant sur deux fronts. Les Britanniques attaqueraient au nord près d'Arras, tandis que les Français porteraient leur estocade plus au sud, dans l'Aisne, le long de la rivière, mais aussi plus à l'est en Champagne, aidés par le corps expéditionnaire russe. L'espoir d'une issue victorieuse prochaine gagna l'arrière et le front. Mais les Allemands avaient assuré leurs arrières et s'étaient solidement installés sur les bordures découpées du plateau du Chemin des Dames, promontoire idéal pour observer les mouvements et les préparatifs des Français. D'anciennes carrières, ouvertes sur les coteaux, les fameuses « creutes », offraient aussi aux Allemands des abris sûrs et des positions de choix pour les nids de mitrailleuses.

Les Allemands ainsi retranchés, attendaient les Français de pieds fermes, « doigt sur la gâchette ». Des généraux tentèrent de persuader Nivelle d'annuler l'opération. Pétain, jugé trop frileux fut écarté. Nivelle s'entêta et lança l'offensive le matin du 16 avril 1917 en utilisant des schémas tactiques bien connus, ceux du couplage artillerie/infanterie. Le mauvais temps s'invita. La préparation d'artillerie des 5 000 canons français fut d'une efficacité limitée malgré cinq millions d'obus tirés en cinq jours. La préparation d'artillerie s'éternisa aussi. Huit jours de plus que prévu, mettant à mal l'effet de surprise. Les Allemands étaient parfaitement informés des plans et des intentions français.

Les troupes se lancèrent en contrebas du plateau, contre des nids de mitrailleuses sous abris bétonnés organisés en quatre rangées, défendus par des lignes de barbelés intactes. Les Français se firent faucher et seules quelques unités parvinrent à atteindre les crêtes. Pourtant Nivelle ne se découragea pas et continua, s'entêta. Le nombre de pertes ne cessa de croître. Les combats acharnés, qui devaient durer 24 heures, se poursuivirent jusqu'en mai. Le 5 mai 1917, à Berry-au-Bac (un des hauts lieux de la guerre de mines, sous le nom de « côte 108 »), les Allemands, surpris, virent évoluer sur le champ de bataille et pour la toute première fois l'artillerie spéciale : les premiers chars lourds français, Schneider et Saint-Chamond.

L'estimation des pertes pour cette sanglante bataille fit l'objet de polémiques en fonction de la période et du terrain retenus. Les chiffres furent interprétés par les politiques qui voulaient, soit arrêter l'offensive, soit la continuer. Après deux mois d'offensive, le député Favre les estima à près de 200 000 hommes du côté français. Les tirailleurs sénégalais, notamment, perdirent par le froid, la maladie ou le feu, plus de 7 000 hommes sur les 16 500 engagés dans les premières journées, soit le quart de leurs pertes totales au cours de la guerre. Quant au bilan allemand, il était encore moins aisé à réaliser. En juin 1917, l'Etat-Major français estima les pertes allemandes autour de 300 000 hommes, ce qui était possiblement, volontairement exagéré.

Le général en chef allemand Ludendorff écrivit dans ses mémoires de 1919 au sujet de la bataille du Chemin des Dames: « *Notre consommation en troupes et en munitions avait été ici aussi extraordinairement élevée*[547]*.* ». La déconvenue française au Chemin des Dames eut des effets psychologiques néfastes dans les rangs de l'armée française. Fatigués après presque trois ans d'une guerre dont ils n'entrevoyaient pas l'issue, démoralisés par les lourdes pertes subies en vain, les soldats refusèrent d'obéir aux ordres (en ce sens il s'agissait plus d'une « grève » que de mutineries).

[547] Général Ludendorff (1932). Premier quartier-Maître Général des Armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II.* Traduction intégrale et définitive, avec une préface du Général Buat, ex-Chef d'Etat-Major, général de l'Armée. Payot, Paris, 1932. Offensive de l'Entente du premier semestre 1917. p. 33

Ces hommes furent mis aux arrêts pour refus d'obéissance. Les tribunaux militaires prononcèrent 3 427 condamnations dont 554 à mort. À sept reprises, Pétain refusa de transmettre les dossiers de recours en grâce et 43 soldats furent in fine passés par les armes « pour l'exemple ». Le président Raymond Poincaré intervint et destitua Nivelle de son commandement, remplacé par Pétain, beaucoup plus proche et soucieux de ses hommes, qui hérita d'une armée épuisée, au bord du précipice et complètement démoralisée.

L'erreur de Nivelle ne fut pas reproduite par le GQG dans la planification de ses opérations du second semestre 1917. Les offensives françaises de l'été 1917, à Verdun, en rive gauche de la Meuse (côte 304, Le Mort Homme), en Flandre et à la Malmaison furent menées avec succès en exploitant les circonstances du moment et les opportunités.

3.4.2 Offensives britanniques en Artois

Les alliés britanniques furent, au même moment, plus heureux dans la conduite de leurs opérations militaires. Planifiée plus au nord, en Artois, ils déclenchèrent aussi une vaste et ambitieuse offensive. Du 8 au 12 avril 1917, les Canadiens (sous le commandement du général Arthur Curry, cf. Figure 95) se lancèrent à l'assaut de l'immuable et imprenable crête de Vimy (*Vimy Ridge*) aux mains des Allemands depuis 1914, une hauteur, jugée stratégique, embrassant tout le bassin minier. Les « bûcherons » canadiens, d'une efficacité tactique redoutable, mus par un courage à toute épreuve, prirent la crête fortifiée. Pour les Français, la déroute de Nivelle sur le Chemin des Dames ôta le statut de grande victoire à cette avancée canadienne. Pour les Canadiens, c'était une victoire importante. Plus au sud, les Britanniques attaquèrent sur les deux rives de la Scarpe, aux alentours d'Arras (bataille d'Arras, du 9 avril au 16 mai 1917) pour soutenir l'offensive Nivelle. Mais après avoir constaté l'échec français sur le Chemin des Dames, ils décidèrent de maintenir la pression sur les Allemands. Les Britanniques n'avaient plus le choix, il fallait tenir en France, alors que le front belge se réveilla à nouveau.

Figure 92 :Le Général canadien Arthur Currie (à gauche)[548] premier commandant national du corps expéditionnaire canadien, et Vimy (village en ruine) observé depuis la crête de Vimy après avoir été pris par les Canadiens, en avril 1917 (à droite)[549].

3.4.3 Les batailles de Messines et de Passchendaele et le calvaire de la boue des Flandres

En Flandre occidentale, les Britanniques qui n'avaient pas réussi à déloger les Allemands de ce secteur du front depuis 1914, décidèrent alors d'enfoncer le front à Messines, sur les hauteurs de *Wytschaete Ridge,* au sud d'Ypres, en préparant minutieusement l'offensive par le recours massif aux mines de sape souterraines (*Underground Warfare, Tunnel Warfare*).

---

[548] General Currie, Commander of the Canadian troops in France, and A.D.C. Bibliothèque et Archives Canada. Juin 1917.

[549] Library and Archives Canada.

Le général Charles Harington (cf. Figure 94), en charge de ces opérations dit : « *L'offensive de Messines ne changera pas le cours de l'Histoire, mais qu'elle changera certainement la topographie*[550] » (cf. Figure 93).

25 charges furent placées sur un front de 11 km et furent actionnées simultanément le matin du 7 juin 1917 (cf. Section 3h du présent manuscrit), parmi lesquelles une mine de 50 tonnes d'explosif de type *Ammonal* qui propulsa le sol à 1 200 mètres d'altitude et générant une secousse perceptible à Londres. L'artillerie britannique se déchaîna, couvrant l'infanterie, avec l'aviation et avec un des plus puissants tirs de barrage de toute la guerre. Les Allemands tardèrent à réagir ; 10 000 hommes furent tués et 7 000 autres se constituèrent prisonniers. Les Allemands firent affluer la réserve en soutien, mais il était trop tard. Messines fut prise par les Néozélandais au terme d'un remarquable fait d'arme des *Otago Mounted Rifles* (OMR) puis le flanc sud du saillant d'Ypres se retrouva sous contrôle des Britanniques. Ces derniers poursuivirent, mais avancèrent lentement en direction de l'est. En juillet 1917, tous les espoirs britanniques furent jetés dans l'offensive de Passchendaele ou troisième bataille d'Ypres (*Ypernschlacht* pour les Allemands) (juillet-novembre 1917).

Une mauvaise préparation et de redoutables conditions climatiques engluèrent les hommes dans la boue des Flandres (cf. Figure 94). Un nouveau commandement transforma cette perspective de percée en nouvelle bataille d'attrition particulièrement éprouvante pour les corps et les esprits.

Figure 93 : Trois entonnoirs de mine de Kruisstraat dans le secteur de Messines et le cratère Spanbroekmolen plus au nord, après l'attaque du 7 juin 1917[551] *.*

[550] Cité dans Willig, D. (2015). *Die Folgen der Grosssprengungen vom 07.06.1917. Schriftenreihe. Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*. p.39.

[551] Simon Jones Historian. *Myths of Messines: Killed by their own mine?* https://simonjoneshistorian.com/2017/06/12/killed-by-their-own-mine/

Figure 94 : Charles Harington[552] (en 1915) (à gauche) et scène de la bataille de Pilckem Ridge. Artilleurs de la Royal Field Artillery tractant une pièce d'artillerie pour l'extraire de la boue. Nord d'Ypres[553].

En août 1917, Pétain attaqua à nouveau à Verdun. S'engagea une offensive nommée « la seconde bataille de Verdun ». Elle avait des objectifs qui étaient certes limités sur le plan stratégique mais avaient une portée avant tout symbolique, en lançant un signal fort à la nation, à l'armée française, aux Allemands mais aussi au monde entier que la victoire sans bain de sang était possible. L'artillerie française écrasa les positions allemandes sous un déluge de feu et les Allemands n'eurent plus la force de contre-attaquer. La Côte 304, en rive gauche de la Meuse, théâtre de violents combats en 1916 fut reprise.

En rive droite, les Français progressèrent aussi sans toutefois récupérer leurs positions d'avant février 1916. De là, les Allemands ne cessèrent de harceler les positions françaises par des bombardements d'artillerie, en ayant recours systématiquement aux projectiles chimiques.

En janvier 1918, le rapport du sénateur Cazeneuve devant le Sénat relata le pilonnage allemand et l'emploi de quantités importantes de munitions chimiques diversifiées et caractéristiques de la seconde moitié de la Grande Guerre (1917-1918). « *Du 31 juillet 1917 au 20 août 1917, les Allemands ont tiré toutes les nuits des obus spéciaux sur le front de Verdun. […]. Le nombre des obus tirés a été très considérable et peut être évalué à un million. […]. Du 20 septembre au 4 octobre la région de Verdun a été continuellement bombardée par des obus au sulfure d'éthyle dichloré tirés en très grande quantité et il a eu environ 5 000 évacués la plupart légèrement atteints. Depuis le 4 octobre, nos ennemis continuent leurs bombardements d'obus à gaz et des tirs plus ou moins importants sont effectués presque quotidiennement sur notre front*[554]».

La carte de la Figure 95 page suivante montre la position du front occidental en 1917 et précise les secteurs de ma Picardie, de l'Artois et de la Flandre occidentale où se déroulèrent les grandes offensives britanniques.

---

[552] Bassano Ltd, vintage print, 1915.

[553] Imperial War Museum, London. Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer). 02/08/1917, number Q 5938.

[554] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Sénat. « Rapport fait par la commission de l'Armée sur deux corps asphyxiants nouveaux utilisés par les Allemands (le sulfure d'éthyle bichloré et le chlorure de diphénylarsine » par M. Cazeneuve (adopté le 16 janvier 1918).

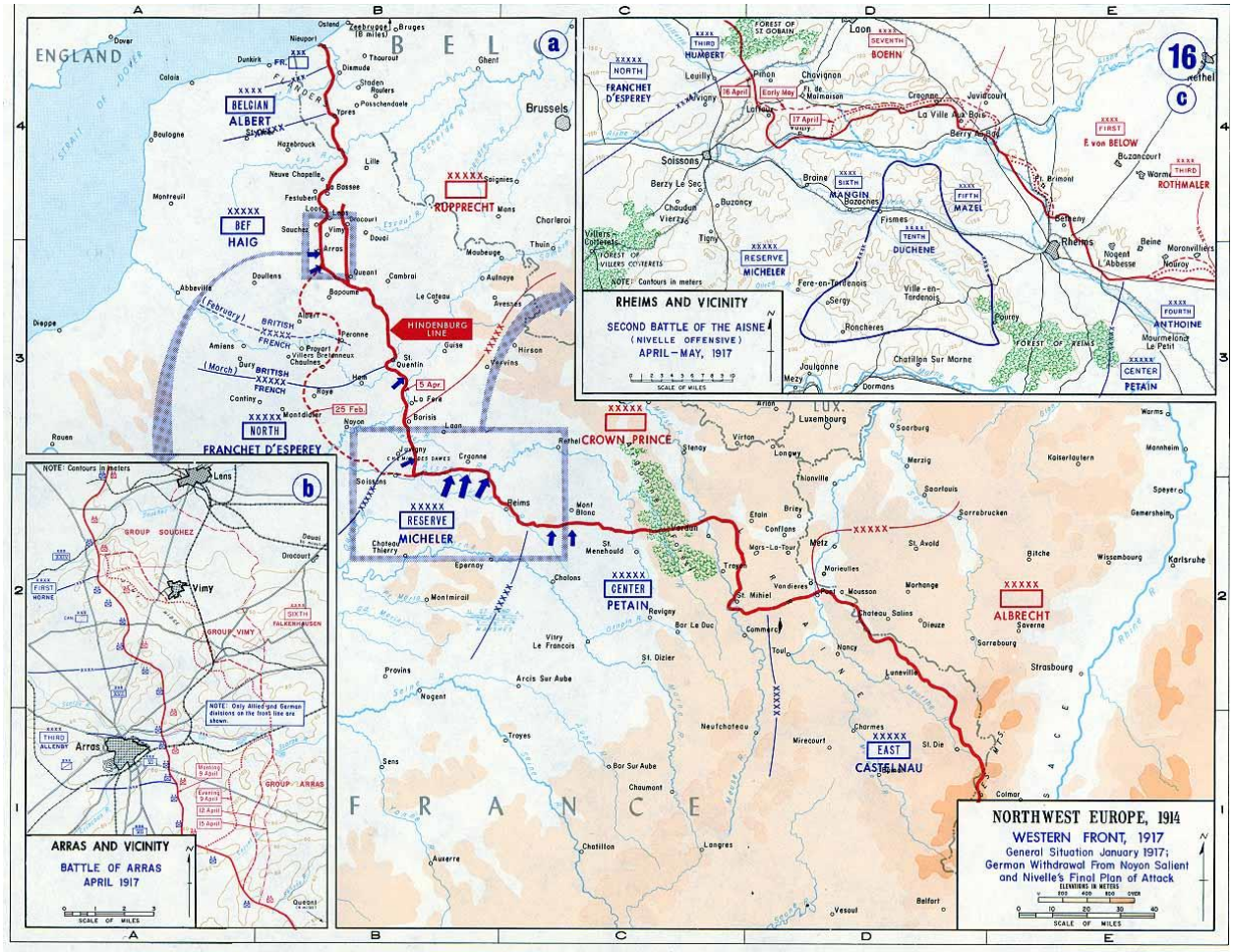


Figure 95 : Front occidental en 1917 et les grandes offensives britanniques en Artois et en Flandre occidentale[555].

3.4.4 Les Révolutions et capitulation russes

L'année 1917 fut aussi sur le front occidental une charnière entre la guerre de position qui semblât dans l'impasse et la reprise d'une guerre de mouvement oubliée depuis l'hiver 1914. Elle vit en effet le subtil équilibre des forces basculer en faveur de l'Alliance sous l'impulsion d'évènements géopolitiques majeurs exogènes au théâtre ouest-européen. En Russie, la révolution de Février, (du 23 février 1917 (8 mars 1917 dans le calendrier grégorien) au 3 mars 1917 (16 mars 1917 dans le calendrier grégorien)), provoqua en quelques jours l'abdication de l'empereur Nicolas II et avec lui la fin de l'Empire russe, du régime du tsarisme et de la dynastie des Romanov. Après la révolution de février, il existait de forts espoirs de paix dans la population, et particulièrement au sein de l'armée, dont les capacités de combat se détérioraient rapidement, minée par l'indiscipline. Pourtant, Alexandre Kerenski, le Ministre de la Guerre du gouvernement provisoire, chef du parti socialiste Menchevik, et dirigeant du gouvernement provisoire à compter de juillet 1917 (en remplacement du prince Lvov) décida d'une grande offensive russe dans l'espoir qu'une importante victoire lui permettrait de regagner les faveurs du peuple et restaurerait le moral des troupes, renforçant ainsi le gouvernement provisoire.

[555] The History Department of the US Military Academy West Point.

L'offensive Kerenski encore appelée « Offensive Broussilov » (du nom du général Broussilov qui mena cette opération) fut lancée par les russes contre les troupes austro-allemandes en Galicie le 1er juillet 1917. Ce fut un échec cinglant sur le plan militaire et une catastrophe politique. Les lignes russes furent complètement brisées le 20 juillet. Le 23 juillet, les Russes avaient reculé de 240 kilomètres.

Le gouvernement provisoire s'en trouva très affaibli. L'armée russe renonça alors à toute initiative militaire dans une guerre qui n'avait plus l'adhésion de la population russe qui aspirait dans son immense majorité à la fin des combats. Indiscipline, désertions et refus d'obéissance parachevèrent l'effondrement et la dissolution de l'armée russe. Le terreau du soulèvement insurrectionnel d'octobre 1917 était ainsi posé. Lénine et Trotski à la tête du parti bolchevik renversèrent lors de la Révolution d'Octobre (qui eut lieu dans le calendrier julien dans la nuit du 25 octobre 1917 (7 novembre 1917 dans le calendrier grégorien)), le gouvernement provisoire ainsi que le *Soviet* des députés ouvriers et des délégués des soldats de Petrograd, (actuelle Saint-Pétersbourg) qui se partageaient alors le pouvoir. La mise en place d'un gouvernement bolchévik accéléra l'adoption d'un décret de paix par le Congrès des *Soviets* le 8 novembre 1917. Trotski, en tant que Commissaire du Peuple aux Affaires étrangères, proposa aux Alliés et aux eEmpires centraux une paix générale. L'armistice fut signé le 5 décembre 1917 à Brest-Litovsk (Biélorussie) entre les Russes et la quadruplice (le *Reich*, l'Autriche-Hongrie, l'Empire ottoman et la Bulgarie), avec une prise d'effet le 15 décembre 1917, pour une durée de deux mois. Les pourparlers de paix s'ouvrirent une semaine plus tard, mettant ainsi fin aux engagements des forces allemandes sur le front oriental. Mais les autorités allemandes campèrent sur une position intransigeante ce qui conduisit le pouvoir bolchevik à se retirer des négociations. L'armitsice, deux mois plus tard après sa première signature ne fut pas renouvelé avec comme conséquence militaire la reprise des avancées allemandes, austro-hongroises et ottomanes à l'intérieur du territoire russe, obligeant ainsi les autorités bolcheviks à signer le 3 mars 1918 le traité de Brest-Litovsk.

3.4.5 *Letzte Hieb*

L'Allemagne, libéréee de son front oriental pouvait alors espérer projeter l'ensemble de ses forces à l'ouest. Le moment était venu pour obtenir une décision militaire définitive sur le front occidental. Il fallait frapper sur le front occidental avant que celui-ci ne soit renforcé par l'arrivée massives des troupes américaines, entrées en guerre contre l'Allemagne en avril 1917. La grande offensive fut décidée en novembre 1917. Pour les Allemands, elle devait être le « *Letzte Hieb* » (littéralement « le dernier coup »). Renforcée à l'ouest sur le plan militaire, l'Allemagne connaissait des difficultés sociales et politiques intérieures. A la fin 1917 le *Burgfrieden,* l'union sacrée allemande, se lézardait, prémice à l'agitation sociale qui se répandit dans les usines au début de l'année 1918. Les civils ne comprenaient plus les souffrances, la faim et les privations quotidiennes qu'ils eurent à endurer pour une guerre, meurtrière, sur un sol étranger, qu'ils n'avaient jamais vu. L'Allemagne et son « *Heimatsfront*[556] » commencèrent à vaciller de l'intérieur.

3.4.6 « *J'attends les Américains et les chars*[557] » et la radicalisation des positions

Les Alliés, épuisés après les coups d'assommoir du Chemin des Dames, la longue bataille d'usure autour d'Ypres et le « Verdun italien » à Caporetto, furent en proie à la crise des effectifs. Il fallait pourtant tenir alors que les positions des états-majors s'endurcirent. Toute tentative d'une paix négociée sur la base d'un compromis était devenue illusoire par la radicalisation des enjeux et le consentement des individus et des sociétés, investis dans l'effort de guerre. La capitulation de l'ennemi sans conditions était pour les Alliés la seule porte de sortie possible du conflit.

---

[556] Un terme difficilement traduisible : front de l'arrière, front domestique, du foyer.

[557] Discours public du général Philippe Pétain du 17 décembre 1917.

Il fallait tenir jusqu'à l'arrivée de nouvelles forces alliées. L'entrée en guerre des États-Unis, jusqu'alors neutre, le 6 avril 1917, d'abord aux côtés de la Triple-Entente alliée, puis avec elle, insuffla un nouvel espoir ; « *J'attends les Américains et les chars* » déclara publiquement, le 17 décembre 1917, le général Pétain pour tenter de regalvaniser les troupes françaises après l'échec des grandes offensives de 1917 en prévision de la reprise de la guerre de mouvement, au terme de ce que le général Palat qualifia rétrospectivement d'*année d'angoisse*[558]. Mais l'Armée des Etats-Unis restait à créer, à mobiliser, à entraîner aux conditions et matériels de combats, puis à débarquer sur le théâtre des opérations ouest-européen. En 1917, l'apport humain et matériel américain resta essentiellement symbolique et marginal sur le plan opérationnel.

3.5. 1918. LA RUPTURE DES EQUILIBRES[559] ET LE RETOUR D'UNE GUERRE DE MOUVEMENT

En janvier 1918, une grève éclata à Vienne et se propagea en Rhénanie, à Essen (usines Krupp, hautement stratégique pour l'industrie de l'armement allemande), puis à Berlin dans les usines de munitions. Des centaines de milliers d'ouvriers débrayèrent. Ce geste de protestation était avant tout politique pour réclamer la paix à l'est (entérinée par le traité avec les Russes, signé le 3 mars 1918 à Brest-Litovsk), mais aussi à l'ouest. Le Gouverneur militaire de Berlin menaça les grévistes, qui n'étaient pas à leur poste de travail le 4 février à 7 heures, d'être enrôlés de force dans l'Armée. Finalement, 50 000 grévistes furent envoyés se battre à l'ouest.

Plus que décisive sur le plan militaire, l'entrée en guerre des USA en avril 1917 fut un levier essentiel qui précipita les possibilités d'offensives décisives allemande dans une fenêtre de tir très étroite, celle entre la mobilisation totalement opérationnelle sur le sol français d'une armée massive des USA et le redéploiement des troupes allemandes depuis du front de l'est. Entre les deux, presqu'un an. C'est dans cette intervalle de temps que les Allemands décidèrent de frapper fort et commencèrent par transférer cinquante-deux divisions du front oriental vers le front occidental (soit 500 000 hommes). Elles étaient dotées de moyens modernes de communication, de mitrailleuses lourdes, de soutien aérien et de transports pour les munitions, au détriment d'autres divisions.

« *Relativement lent depuis 1914, le tempo de la guerre s'accélère pour déboucher sur sa conclusion, sur tous les fronts*.[560] »

3.5.1 Les grandes offensives allemandes du printemps 1918.

Les affres internes de l'Allemagne – agitation sociale, grèves, tensions politiques – furent mises entre parenthèses pour concentrer la nation vers l'ultime effort. Le 21 mars 1918, la première offensive dite « du printemps », dénommée offensive *Michael* par les Allemands (en référence à l'archange Michel qui avait terrassé Lucifer) fut lancée sur un front de 70 kilomètres entre les rivières Scarpe et l'Oise. La préparation d'artillerie déclenchée à 4 h 10 du matin fut d'une extrême violence impliquant de fortes proportions de munitions chimiques: 7 000 pièces tirèrent plus d'un million d'obus en cinq heures. Du 10 au 13 mars 1918, l'artillerie allemande pilonna les positions tenues par la Ve Armée britannique dans le saillant de Cambrai au moyen de 150 000 obus à *Croix jaune* chargés d'*Ypérite,* conformément aux nouvelles tactiques adoptées par l'artillerie allemande (cf. Section 3h du présent manuscrit).

---

[558] Palat, Barthelémy-Edmond, général (1927). *L'Année d'angoisse 1917*. Paris, Berger-Levrault, 1927, p. 653.

[559] Duménil, A. (2004). *1918 : les ruptures de l'équilibre*. p. 965, In *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914-1918, op. cit.*

[560] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit.* p. 481.

En face, les Britanniques, qui n'eurent pas le temps de mettre en pratique les principes de la défense en profondeur furent débordés et perdirent 38 000 hommes dont 7 000 tués. Après trois jours d'offensive, Ludendorff modifia son plan. Au lieu d'attaquer au nord, il orienta ses troupes vers le sud et le sud-ouest afin de scinder les jonctions entre armées alliées. Ces brusques changements créèrent en réaction des tensions entre les généraux Haig et Pétain, qui divergeaient sur leurs intentions pour la défensive. La belle Entente était ébranlée au moment où l'entre-aide et l'unité étaient exigées.

Le 3 avril 1918, après la conférence de Beauvais, Foch prit les rênes des armées par un commandement interallié unique. L'avancée allemande atteignit 60 kilomètres, bientôt ralentie par les terrains dévastés des champs de bataille de 1916 sur la Somme. Les Allemands engagèrent, au nord, leur seconde offensive dénommée *Georgette* visant à acculer à la mer, du sud vers le nord, les forces britanniques. La bataille de la Lys constitua un point critique pour l'Armée britannique, qui tint. Fin avril, l'offensive fut suspendue. Foch soulagea les Britanniques en appelant des réservistes français. Le 27 mai 1918, Ludendorff déclencha entre Soissons et le Chemin des Dames la troisième offensive dite *Blücher* afin d'empêcher les troupes françaises de venir épauler et renforcer les Britanniques. L'attaque progressa de 15 à 25 kilomètres. Le 30 mai, les berges de la Marne étaient atteintes. Les troupes allemandes retrouvèrent leurs lignes d'avancée maximale de septembre 1914, aux portes de Paris. Les trois offensives et la position du front au terme de l'avancée allemande du printemps 1918 sont localisées sur la carte de la Figure 96 ci-après.

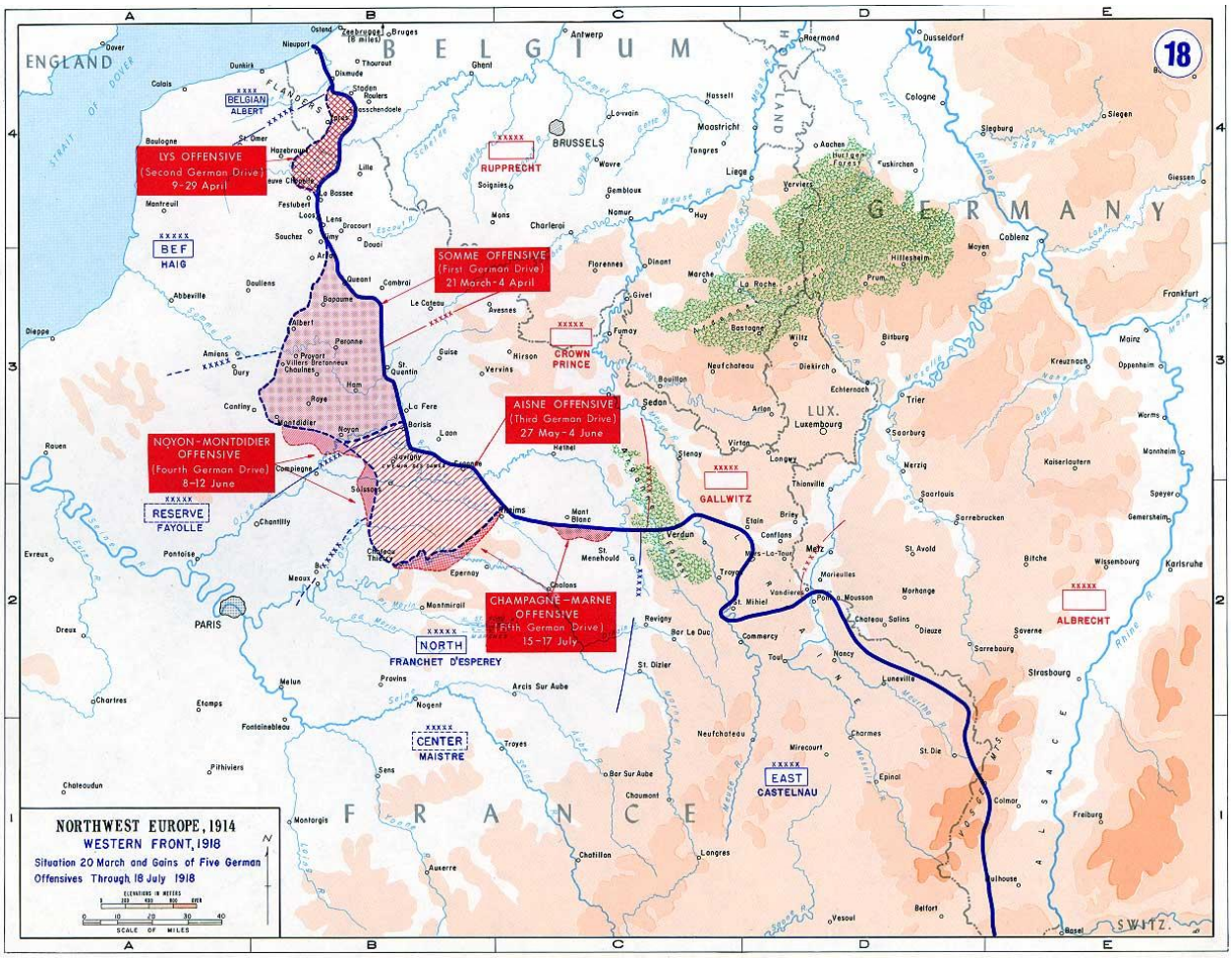


Figure 96 : Carte de la position du front et des grandes offensives allemandes du printemps 1918[561].

[561] The History Department of the US Military Academy West Point.

3.5.2 « Lafayette nous voilà[562] »

Progressivement, pendant ce temps, les *Sammies* ou *Doughboys* de l'*American Expeditionary Force* (AEF) débarquèrent en France, opérationnels après leur entraînement. Ils s'instruisirent alors plus avant au contact des Poilus expérimentés et rompus à la Grande Guerre.

Le général John Pershing (cf. Figure 97 ci-contre) fut placé à leur tête. La Ier Armée des Etats-Unis fut positionnée en Lorraine (avec un quartier général à Souilly (en Meuse, sur la Voie Sacrée) alors que la IIe Armée stationna aux confins de la Champagne (région de Fismes) et de la Picardie (région de Château Thierry). Le Grand Quartier Général fut établi à Chaumont (département de la Haute-Marne) qui accueillit aussi sur le terrain dénommé *Hanlon Field* le centre d'essai de la guerre chimique des Américains.

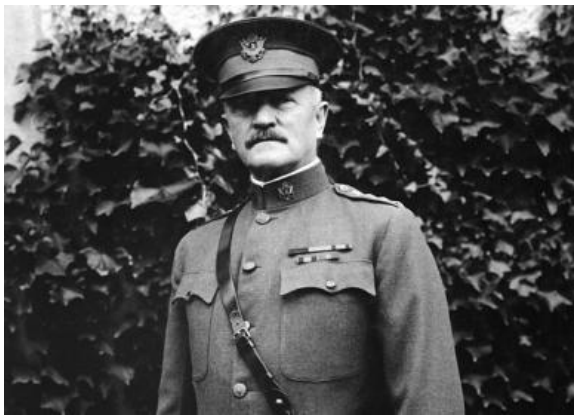


Figure 97 : Le Général John Pershing, commandant l'American Expeditionary Force (AEF) au Grand quartier général de Chaumont, 18 octobre 1918[563].

Un centre d'instruction et d'entraînement aux tactiques, techniques et armements de la guerre des tranchées fut installé à Martigny-les-Bains à proximité de Vittel (département des Vosges). La puissance des Américains était soutenue par un cordon ombilical logistique serpentant entre les ports de l'Atlantique et la Lorraine, en passant par la Touraine, le Cher. Les contre-offensives franco-américaines, avec l'emploi de chars, de nombreux avions et la combativité des Américains, stoppèrent l'avancée allemande. Bien que des négociations aient été engagées entre diplomates, Ludendorff s'entêta. Il renonça, dans un premier temps, à l'offensive prévue dans les Flandres. Les Alliés avaient l'initiative. Définitivement. La machine de guerre allemande marchait sur des ressorts tendus à l'extrême, jusqu'à la rupture.

3.5.3 La contre-offensive alliée de juillet 1918 et l'effondrement de l'armée allemande

> « *Ils [ndlr : les soldats] ont l'air de fantômes, ils sont pâles, affamés, leurs uniformes déchirés, pleins de puces, marchant qu'au petit trot, il y en a qui ne ressemblent plus à des êtres humains* [564]».

En juillet 1918, Ludendorff était encore intimement convaincu d'une possible victoire de l'Allemagne sur les Alliés. Un mois plus tard ses certitudes s'ébranlèrent. L'Allemagne, qui venait de remporter au printemps 1918 un spectaculaire succès militaire par le mouvement de troupes, ne put consolider ses positions, en proie à l'arrière à de graves insuffisances logistiques : le fourrage pour les bêtes manquait, le caoutchouc faisait défaut pour équiper des roues en acier des camions, qui, nues, n'agrippaient plus le sol. « *Plus l'envahisseur avance, plus il s'éloigne de ses ressources*[565] ».

---

[562] Formule prononcée le 4 juillet 1917, jour anniversaire de l'indépendance et fête nationale aux Etats-Unis, par le colonel de l'Armée des États-Unis (et aide de camp du Général John Pershing commandant en chef du corps expéditionnaire américain) Charles Egbert Stanton, sur le tombeau du Marquis de La Fayette au cimetière de Picpus (Paris).

[563] Library of Congress. General John Pershing. General Headquarters, Chaumont France. https://loc.gov/pictures/resource/cph.3a15843/

[564] Krumeich, G. *La légende du coup de poignard dans le dos*. In François, E., Schulze, H. (2007). dir. Mémoires allemandes, Paris, Gallimard « Bibliothèque illustrée des histoires » cité dans Becker, J.J., & Krumeich, G. (2012) *La Grande Guerre, une histoire franco-allemande.* p.277.

[565] Bardiès, L. (2023). *Guerre et « point ne culminant de la victoire » Clausewitz en Ukraine*, op. cit.

L'artillerie lourde, fer de lance des Allemands aux premières heures de la Guerre, vint aussi à manquer, obligeant à déplacer les pièces d'un point à l'autre du front. Les Allemands furent aussi ralentis par les conditions des terrains qu'ils avaient eux-mêmes défoncé en 1916 par le « marmittage » de leur Artillerie.

Les franco-britanniques amortirent les offensives allemandes, préparant ainsi le retournement des forces. Pétain avait déclaré en août 1917 attendre les Américains et les chars « *c'est bien avec les seconds, mais sans l'aide des premiers et en infériorité numérique*[566] » que les franco-britanniques allaient remporter sur le front de l'ouest des victoires capitales à l'été 1918. Ce sont les Français aidés de leurs alliés britanniques qui furent les acteurs de la victoire, parachevée par les offensives américaines de l'automne 1918. En juillet 1918, les Etats-Unis avaient déjà débarqué un million d'hommes en Europe, date à laquelle les Alliés lancèrent une vaste contre-offensive contre les Allemands sur le front occidental. Elle surprit les Allemands lors de la Bataille d'Amiens le 8 août 1918, qui perdirent sous les assauts canadiens 30 000 hommes ; la « *Journée Noire*[567] » de l'Armée allemande selon Ludendorff. Il savait à ce moment-là la guerre perdue. Il demanda à son armée de se placer dans une posture défensive. Pour lui, l'armée ne devait pas plier, mais se retirer pour résister à court ou moyen termes et user l'adversaire et « *Paralyser la volonté de l'ennemi à combattre* ». L'Allemagne chercha alors par ce biais une paix sans triomphe mais avantageuse, pour peser aussi lorsque des pourparlers pour la paix seraient à engager. Mais la résistance des Allemands n'était pas au rendez-vous sur le théâtre des opérations. Le 02 septembre, le corps expéditionnaire canadien rompit la ligne Drocourt-Quéant (la *Wotanstellung*) contraignant les Allemands de se replier sur la ligne Hindenburg. Les attaques alliées usèrent les Allemands, qui retrait après retrait s'inscrivirent dans une logique de défaite.

La Ier Armée du général Pershing, stationnée en Meuse, engagea en septembre et octobre 1918 deux grandes offensives victorieuses pour réduire la saillant de Saint-Mihiel au sud de Verdun (bataille de Saint-Mihiel) et percer le front au nord de Verdun (offensive Meuse-Argonne). Direction Charleville et Sedan. 15 divisions américaines et 22 divisions françaises attaquèrent lors de l'offensive Meuse-Argonne, relayée en Champagne et plus au nord, par les Canadiens de Sir Arthur Currie.

En Flandre occidentale, les Armées placées sous le commandement du Roi Albert 1er enfoncèrent le saillant d'Ypres et prirent Passchendaele et Messines. Fin septembre, les Alliés s'emparaient de la ligne Hindenburg. La France exploitait alors à pleine mesure son investissement tardif de 1916, pour moderniser les usines, les faire tourner pour la guerre : en sortaient en 1918 des chars performants, des avions modernes et des munitions à profusion. La puissance de l'armée et de l'industrie de l'armement français était au zénith.

La Figure 98 montre l'évolution du front et la position des armées entre le 25 septembre et le 11 novembre 1918.

---

[566] Grumberg, P., Goya, M. (2022). « 1918, l'armée française au zénith. La belle armée de la République » In *L'armée française. Deux siècles d'engagement*, Sous la direction de Jean Lopez. Perrin. p.135.

[567] Général Ludendorff (1932). Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II,* op. cit. p.301.

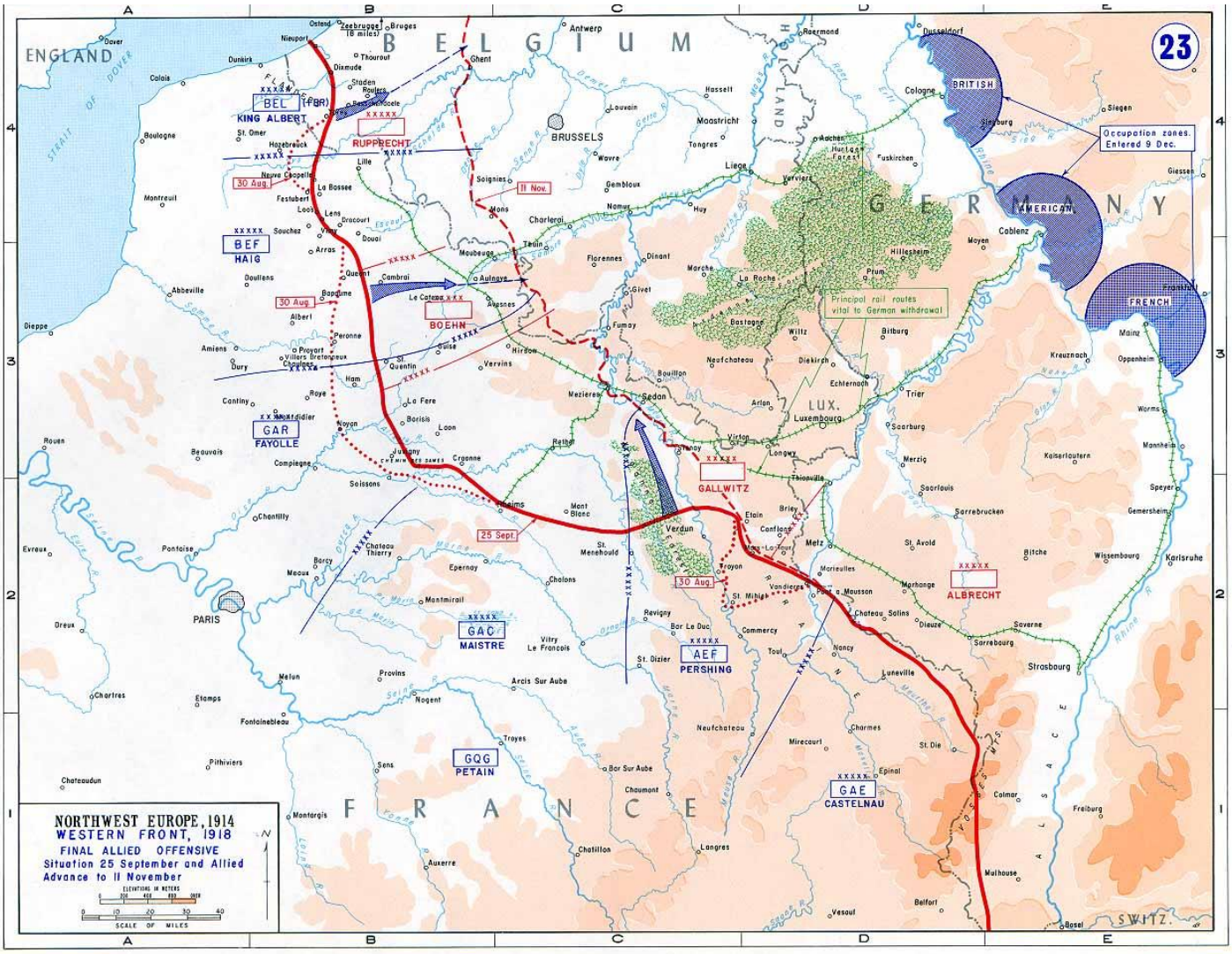


Figure 98 : La grande contre-offensive alliée. Evolution du front et de la position des armées entre le 25 septembre et le 11 novembre 1918[568].

3.5.4 « La guerre a commencé en Orient, c'est là qu'elle finira[569] »

« Ce 15 septembre est peut-être après la Marne, la date la plus importante de toute la guerre[570] ».

Le front d'Orient, entre la Bulgarie, soutenue par les forces de la Triplice faisant face aux Français stationnés autour de Salonique en Grèce, joua en 1918 comme un lointain levier qui précipita sur le plan stratégique la conclusion de la guerre. Le discours officiel de l'OHL largement repris et diffusé par la propagande instilla dans l'opinion publique allemande l'idée que le retrait allemand était une manœuvre magistralement orchestrée par des généraux géniaux et brillants qui cherchaient à repositionner les troupes sur les lignes fortes inexpugnables contre lesquelles l'ennemi allaient se briser. Les Français enfoncèrent magistralement en septembre 1918 le front bulgare, infligeant un sévère démenti aux thèses allemandes.

---

568 The History Department of the US Military Academy West Point.

569 Le Général Franchet d'Esperey, juillet 1918, cité dans Giovanangeli, N., Labaye, E., Ortholan, H. (2008). *1918. Le dénouement*, Paris, Editions Bernard Giovanangeli, 159 p., p.95.

570 F.J. Deygas (capitaine) (1932). *L'armée d'Orient dans la guerre mondiale (1915-1919).* Paris, Payot. p. 244.

Le gouvernement allemand s'aperçut alors de la supercherie et des dissimulations de l'OHL. La défaite et l'armistice bulgares furent un triple désastre pour l'armée allemande.

Premièrement elles précipitèrent la sortie de guerre du principal allié de l'Allemagne, l'empire d'Autriche-Hongrie en pleine déliquescence, puis deuxièmement, cette situation militaire et géopolitique ouvrait la voie aux Alliés, par le sud, vers l'Allemagne et la Bavière qui se sentaient alors menacées et, enfin, troisièmement l'affaire bulgare contraignit donc l'OHL à avouer sa défaite, ce qu'elle voulait à tout prix éviter de faire, et le contrat de confiance entre les militaires et le gouvernement civil fut brisé. Foch savait que la défaite allemande était inéluctable, énonçant qu'une armée qui se replie partout sans pouvoir se rétablir nulle part est une armée battue.

En octobre, l'Allemagne demanda au président des Etats-Unis, Woodrow Wilson des pourparlers pour la paix, qu'il refusa sous prétexte que l'Allemagne occupait encore des territoires envahis, Moselle et Alsace comprises. Les Allemands réagirent et demandèrent que soit créée une commission mixte pour l'évacuation des dits territoires. En faits les Allemands attendaient plus une suspension de l'usage des armes pour se refaire une santé qu'une capitulation avec une paix définitive qui leur serait imposée. Wilson encore une fois, intransigeant, refusa. Le piège n'avait pas fonctionné. Plus que deux alternatives se présentaient aux Allemands : la capitulation rapide ou l'invasion sur les courts à moyens termes. Les Allemands se plièrent à la dialectique wilsonienne. Car parallèlement, la grande Allemagne implosa intérieurement, socialement et politiquement, et sur le terrain, militairement. Les généraux affichèrent encore une confiance de façade face aux évènements. « *Nous ne sommes pas vaincus. Nous ne devons pas capituler* [571]».

Foch et Clémenceau émirent l'idée de conditions modérées dans le règlement de la paix ce qui fut immédiatement interprété côté allemand comme une preuve irréfutable du respect de la France face à un ennemi exceptionnel qui fit montre d'une puissance rare et d'une courageuse résistance. Mais, voilà, entre 750 000 et 1 million de soldats allemands refusèrent de rejoindre leurs unités et restèrent cantonnés dans les ports et les gares d'où ils furent délogés à coup de mitrailleuse. L'armée fatiguée se liquéfia. Ludendorff démissionna fin octobre alors que Foch poursuivait les Allemands par une progression concentrique avec, au nord les troupes franco-belges marchant sur Bruxelles, au centre, les Français et les Britanniques qui foncèrent sur les Ardennes avec à leur aile droite, les *Sammies*.

Et de là, les évènements interconnectés s'emballèrent[572].

3.6. Novembre 1918. La tombée de rideau sur le théâtre des opérations. Quand « *Le bruit d'universelle destruction fait silence*[573]»

Les Français et leurs alliés, furent surpris par le brutal effondrement de l'armée allemande, son manque de résistance et par leur retraite étonnement prématurée. L'Etat-Major qui ignorait tout de l'état de déliquescence réel de l'armée allemande au moment de l'armistice.

[571] M. Von Payer, 26/10/18.

[572] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit*. p. 481.

[573] Barbusse, H. (1916). *Le Feu. Journal d'une escouade*.

Clemenceau lors d'une séance de la Commission des affaires étrangères du 5 février 1919[574] déclara « *Au moment de l'armistice, nous ne savions pas exactement quel était l'état des forces allemandes, et nous avons accepté l'armistice avec l'idée que le lendemain il pourrait n'être plus possible* ». Français et Alliés s'attendaient à une capitulation de l'Allemagne au début de l'année 1919. Quelques jours à peine avant la signature de l'armistice du 11 novembre 1918, un commandant de l'armée disait encore à un homme politique [non nommé] « *Nous allons nous installer pour un hiver de plus*[575] ». Foch ne voulut pas de cet hiver de plus.

Le 7 septembre, tandis que les Allemands se repliaient sur la ligne Hindenburg, De Castelnau, chef du Groupe d'Armées de l'Est, se vit confier par Pétain l'étude d'une offensive vers Morhange et Sarrebruck, là où en 1914, les Français avaient été défaits. En 1918, Foch imagina y frapper fort en préparant une grande offensive finale et décisive au printemps 1919 pour déporter la guerre sur le sol allemand et commença à rassembler du matériel en Lorraine. L'usage massif de projectiles chimiques pour soutenir cette offensive était aussi planifié. Les Alliés maintinrent leur puissance de feu jusqu'au bout, redoutant toujours une possible contre-offensive de l'ennemi.

Partout, en Palestine, en Bulgarie, en Turquie, les Puissances Centrales plièrent. Fin septembre 1918, Max de Bade, le premier chancelier de l'Allemagne moderne, en accord avec Guillaume II, les généraux Hindenburg et Ludendorff, contactèrent le président Wilson pour obtenir un accord de paix équitable. Après que Ludendorff ait balayé l'idée d'une insurrection et de la levée en masse du peuple à l'encontre des Alliés, d'une bataille finale à outrance (*Endkampf*[576]), et une guerre de défense en zone profonde menée sur le sol allemand, prévue pour le printemps 1919, il démissionna. Suite aux déconvenues de la Triplice en Orient et à l'effondrement de l'allié austro-hongrois, l'Allemagne fit savoir aux Alliés son désir de mettre fin aux hostilités via un armistice ou ce que Ludendorff, évitant ce terme, désigna comme « offre de paix ». Il voulut faire porter la responsabilité de ce revers militaire sur le parlement et la nouvelle gouvernance civile du chancelier Max de Bade et se plaça dans une posture de victime d'un « coup de poignard dans le dos[577] » assené pat la nouvelle autorité civile, la gauche révolutionnaire et les juifs.

Ouvriers et soldats allemands se soulevèrent, le 03 novembre à Kiel, et à Munich le 07. Le 09, la révolution et une guerre civile éclatèrent à Berlin opposant l'armée régulière fidèle (les corps francs ou *Freikorp*) et les révolutionnaires qui adhérèrent aux nouveaux espoirs soulevés par le communisme (« Spartakistes »). L'empereur Guillaume II abdiqua le même jour. La république de Weimar fut proclamée. La guerre sur le front ouest pouvait enfin s'approcher de son terme. Le 7 novembre 1918, un groupe de voitures venant des lignes allemandes se présenta sur le front face aux combattants français à La Capelle dans le Nord (à proximité de Trélon), non loin de la frontière belge, transportant la délégation allemande depuis Berlin avec les pleins pouvoirs de son gouvernement pour signer avec les Alliés la cessation des hostilités. En août 1914, les soldats galvanisés par la guerre déclarée montaient – fleur au fusil - dans des trains bondés. Le 10 novembre 1918 ce fut un autre wagon qui attendit les représentants militaires alliés (l'amiral britannique Hope, le général Weygand, l'amiral britannique Wemyss, le maréchal Foch, le capitaine de la *Royal Navy* Marriott) et les plénipotentiaires allemands. Il se tint au milieu d'une clairière, celle de Rethondes, en forêt de Compiègne (département de l'Oise).

---

[574] Cité dans Cabanes, B. (2004). *La Victoire endeuillée. La sortie de guerre des soldats français (1918-1920).* Editions du Seuil, p.35.

[575] Tardieu, A. (1921). *La paix*. Editions Perrin. 2019. p. 92.

[576] Littéralement « Bataille finale ».

[577] *Dolchstoßlegende* ou « la légende du coup de poignard dans le dos ».

Les plénipotentiaires allemands avaient à leur tête Matthias Erzberger, représentant du gouvernement allemand, accompagné d'un diplomate, le comte Von Oberndorff, d'un attaché militaire parlant couramment français, le général Von Winterfeldt, d'un interprète, le capitaine Von Helldorf, d'un sténographe et deux autres militaires, le capitaine Vanselow et le capitaine d'Etat-Major Geyer.

Le 11 novembre 1918 vers 5h30 du matin, l'armistice (valable un mois, renouvelable) était signé. Les hostilités cessèrent subitement sur le front occidental ce jour de Saint-Martin[578]. Cette guerre ne s'acheva pas par une bataille ultime et décisive mais par le renoncement d'une Allemagne qui savait la victoire devenue impossible.

Le soldat dans sa tranchée, resta partagé ce matin-là entre cette joie captive, le soulagement d'être en vie, et la tristesse d'avoir vu partir ses camarades, à quelques mètres de lui, sur la trajectoire d'un morceau de métal. A l'arrière, n'ayant jamais vu la guerre, ce fut la liesse. L'armistice entra en vigueur à 11h00, annoncé par des coups de clairon, alors que 10 minutes avant, le soldat Augustin Trébuchon tomba au combat à Vrigne-Meuse dans les Ardennes. Le dernier mort de la guerre. Jamais le fossé entre arrière et le front ne fut aussi prononcé qu'en cette conclusion.

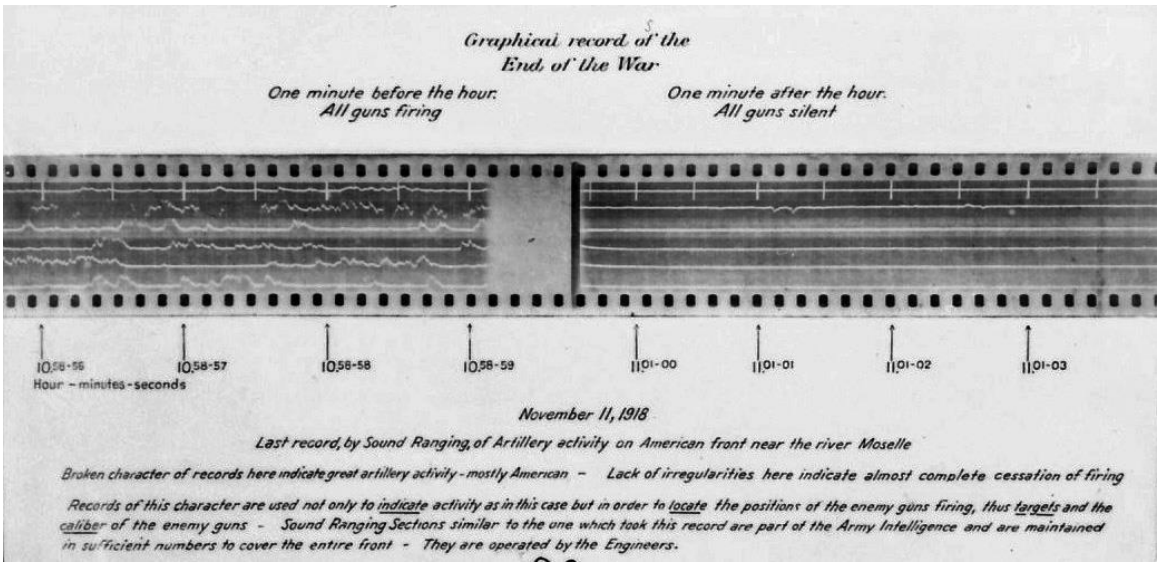


Figure 99 : Sonagramme américain capté dans le secteur lorrain du Bois-le-Prêtre (département de la Meurthe-et-Moselle) le 11 novembre 1918[579].

[578] Saint-Martin-de-Tours, père de l'Eglise et protecteur de la France. Martin meurt à Candes sur Loire à la fin de l'automne, le 8 novembre 397 sur un lit de cendre comme mouraient les saints hommes. Son corps est rapidement reconduit par le fleuve jusqu'à Tours où il est enterré le 11 novembre.

[579] Sur le plan technique, un enregistrement de l'environnement incroyablement sonore de la guerre était possible. Il n'y eut pourtant que peu de captation de la guerre. Ce document est la seule trace du bruit de la guerre. Il s'agit d'un sonagramme, un enregistrement des vibrations de l'air, destiné à localiser les tirs adverses pour orienter un tir de contre-batterie. Celui-ci couvre une minute avant le 11 novembre à 11 :00, à gauche, durant laquelle tous les canons sont en action, faisant tressauter le stylet qui imprime le bandeau. A droite, après 11 :00, c'est le calme plat. Des lignes plates tout juste rompues par une encoche : un tir de joie d'un *Sammies*. D.R. Military Survey Historic Archive https://www.militarysurvey.org.uk/Historic%20Archive/Major%20Conflicts%20and%20Operations/World%20War%201/WW1%20Sound%20Ranging/2.%2011%20Nov%201918%20Sound%20Trace%202.jpg

« *Qu'est ce qu'un armistice ? Un armistice est une suspension d'armes, une cessation des hostilités qui a pour but de discuter la paix […]*[580] ». S'ouvrit avec le silence des canons, une autre période de 229 jours, entre la première signature de l'armistice (renouvelable) du 11 novembre 1918 et la signature du Traité de Versailles du 28 juin 1919, un intervalle de temps qui n'était plus vraiment la guerre mais pas encore la paix, antichambre entre guerre et paix. L'armistice du 11 novembre 1918, valable sur 36 jours fut renouvelé le 13 décembre 1918 et le 16 janvier 1919, puis reconduit le 16 février jusqu'à la signature du Traité de Versailles (le 28 juin 1919). Cet intervalle de temps fut résolument celui d'une transition inédite entre l'autorité militaire omnipotente durant 4 ans et les nouvelles instances administratives régaliennes civiles confrontées à de nouveau défis nés de la guerre et dans la guerre : la gestion de la mort de masse et le deuil, le relèvement des ruines et la reconstruction des territoires dévastés.

Figure 100 : Population de la ville de Tournai (Belgique), pavoisant après avoir renversé une guérite de garde du poste frontière. 12 novembre 1918[581]*.*

[580] Interview du Marechal Foch publiée dans le quotidien *Le Matin* le 8 novembre 1920. Cité dans Tardieu, A. (1921). *La paix*, *op. cit.* p. 92

[581] Établissement de Communication et de Production Audiovisuelle de la Défense (ECPAD), collection Marcel Lorée, référence SPA 37 LO 2219.

4. *In Stahlgewittern*[582]

L'Artillerie, les matières explosibles et agressives et les matériels militaires mécanisés prirent au cours de la Première Guerre mondiale une place de prime importance totalement inédite dans la conduite des combats. Ce chapitre de la Section 3h décrit et explicite leurs principales évolutions tant quantitatives que qualitatives au cours de la guerre.

4.1. DEMULTIPLICATION DES CALIBRES AVEC L'AFFIRMATION D'UNE ARTILLERIE TOUJOURS PLUS PUISSANTE

En 1914, l'unité de calibre était la règle dans l'artillerie française avec le 75 mm ; côté allemand (77, 105 et 150 mm) et britannique (76,2, 83,4 mm, 4,5 *inches*). les calibres étaient également très limités et au nombre de trois[583]. Puis, au cours de la guerre, les projectiles et les matériels se diversifièrent tout en se spécialisant. « *Au cours du conflit , les types de projectiles se sont diversifiés et les calibres se sont multipliés*[584] » En 1916, le Ministère de l'Armement avait recensé 74 matériels d'artillerie différents[585], tirant de l'ordre d'une centaine d'obus tout aussi différents.

4.2. DIVERSIFICATION DES USAGES ET DES CHARGEMENTS

D'abord à balles, explosifs, en 1914, les chargements évoluèrent aussi vers une plus grande diversité avec notamment des chargements incendiaires et chimiques. Des projectiles éclairants (contenant une capsule qui, après éjection, produisait fumée et lumière durant quatre minutes) étaient également en service dans l'artillerie de tranchée allemande. L'apparition du char (artillerie mobile blindée mécanisée) sur les champs de bataille dès 1916, et l'essor de l'aviation de combat à compter de 1915, entraînèrent en réponse le développement et l'utilisation de matériels défensifs spéciaux, avec d'une part une artillerie anti-char et d'autre part une artillerie anti-aérienne. L'artillerie allemande dénombra pas moins de 160 modèles de fusées (fusantes, percutantes, instantanée ou à retard) en réponse à la démultiplication des usages, parfois très spécifiques, des projectiles de l'artillerie : obus de rupture pour pénétrer les bétons des fortifications, projectiles antichars, anti-aériens, obus à balles, obus chimiques, incendiaires, fumigènes, etc.

4.3. DE NOUVEAUX MATERIELS ET TACTIQUES ADAPTES DE LA GUERRE DE POSITION

4.3.1 La charnière de l'hiver 1914-1915

L'année 1915 fut une charnière dans la guerre, par la bascule des tactiques militaires anciennes héritées du XIXe siècle, connues, enseignées dans les écoles militaires, entièrement tournées vers l'offensive où la rapidité et l'intrépidité des combattants engagés devaient déborder l'adversaire par la manœuvre, vers une guerre de siège, de position que personne n'avait anticipé. L'Artillerie, arme secondaire et de soutien de l'infanterie en 1914, non seulement s'imposa comme une arme de domination du front, mais s'adapta aussi aux nouvelles conditions tactiques imposées par le combat rapproché de la guerre de position.

---

582 Jünger, E. (1920). *In Stahlgewitter*, *op. cit.*

583 Ortholan, H. (2020). *L'artillerie de la Grande Guerre. 1914-1918*, *op. cit*. p. 215.

584 *Ibid.*

585 Bibliothèque nationale de France. Chef d'escadron Champon, *Le ravitaillement en munitions*, Metz, Centre d'études tactiques d'artillerie, mars 1920, p.5.

Les militaires eurent aussi recours à d'ancienne pratiques obsidionales pour espérer briser un front figé et retrouver les conditions de la guerre de mouvement.

De nouvelles tactiques ont dû être au mieux imaginées, développées, mais aussi improvisées dans la boue des tranchées, tandis que de nouveaux types de matériels firent leur apparition.

4.3.2 Adaptation de l'Artillerie aux combats retranchés et rapprochés. L'artillerie de tranchée ou d'infanterie

Les nécessités de combats rapprochés dans la guerre de position forcèrent l'artillerie à s'adapter par le recours systématique aux canons à tirs paraboliques (en cloche) de l'artillerie de tranchée (encore désignée « artillerie d'infanterie », ancêtre des mortiers) et des obusiers. En effet, le tir droit et tendu des canons d'artillerie classique ne permettait pas d'atteindre le cœur des tranchées. Par ailleurs, tirés à plusieurs kilomètres de leurs cibles, ces projectiles étaient imprécis. Les « lanceurs de bombes » (*Minenwerfer* chez les Allemands) de l'artillerie de tranchée ou d'infanterie (car dirigée par l'infanterie et non plus par les artilleurs) permettaient de vectoriser à courte portée (quelques centaines de mètres), avec précision, de puissants projectiles au cœur même des fortifications de circonstances et tranchées de l'ennemi. Ces engins étaient d'une grande diversité de calibres (de projectiles légers aux mines de 250 mm), de designs. Les chargements étaient explosifs et chimiques. Le Tableau 15 suivant illustre, par l'exemple des matériels de l'artillerie de tranchée allemande, cette très grande diversité des moyens de l'artillerie durant la Première Guerre mondiale.

Mines légère (*Leichte Minen*)	Mines moyennes (*Mittlere Minen*)	Mines lourdes (*Schwere Minen*)
26 type explosives, dont 23 types pour lesquels la production a été arrêtée (restent les types *Anneliese, Ernaliese, Lotte*) ; **14 type de mines à chargement chimique** (*Gasminen*) ; **Trois types de mines porte-message** (contenant une capsule qui après éjection produisait fumée et lumière durant quatre minutes.	**35 type explosifs** dont 29 types pour lesquels la production a été arrêtée (ne restent que les types *Dora, Herta, Marga, Paula*, *Sarah* et *Thea*) ; **Huit types de mines à chargement chimique** dont 7 pour lesquels la production a été arrêtée ; **Quatre types de mines incendiaires** chargées de thermite dont trois types pour lesquels la production a été arrêtée.	**Un type de mine explosive** (*Sieglinde*), la production de 10 types de mines a été arrêtée ; **15 type de demi-mines lourdes explosives**, dont la production a été arrêtée ; **Six type de demi-mines à chargement chimique**, dont la production a été arrêtée.

Tableau 15 : Diversité des projectiles d'artillerie de tranchée allemande. Récapitulatif publié en mars 1918[586].

L'arsenal de l'Artillerie de tranchée était complété par des engins explosifs lancés comme les grenades à main, les pétards ou tirés au fusil dans le cas des grenades à tromblon. Des systèmes originaux de jets de grenades, plus au moins improvisés, furent aussi utilisés comme des catapultes, des arbalètes ou encore des frondes de bandes élastiques. Les pilonnages à fortes densités de tirs par ces « torpilles aériennes » « mines » et « bombes empennées à ailettes » étaient pratiqués en préparation des assauts d'infanterie pour créer des brèches dans le dispositif défensif adverse en déchiquetant les réseaux de fils de fer barbelés. Les besoins en munitions de ces matériels s'avérèrent énormes pour pouvoir espérer des résultats significatifs au front.

[586] *Zusammenstellung der ins Feld gelieferte gezogenen Wurfminen und schweren Flügelminen*, Berlin, 1918.

Les évaluations des besoins militaires étaient d'une implacable rigueur mathématique dans cette guerre technique, comme par exemple dans la définition et le dimensionnement de méthodes de destructions des tranchées :

> *« Pour enfoncer le front adverse, il faut générer une brèche de 100 km sur les 700 km du front. 3 lignes de tranchées doivent donc être détruites sur 100 km. Une torpille (bombe de canon à tir courbe) détruit 5 m de tranchée. Le rendement de ces canons d'infanterie pour une portée de 100 - 500 m est de un cinquième environ. Il faudrait donc lancer dans la tranchée 300 000/5 = 60 000 obus soit, pour être efficace, un tir de 300 000 obus. Il faut ajouter à cela que les entonnoirs faits par les bombes ont 4 m de diamètre de sorte que toutes les bombes tombant dans les tranchées et deux mètres de chaque côté auront un effet sur la tranchée. Le rendement effectif des tirs sera en réalité multiplié par 2 ou 3. Au point de vue construction, le chiffre de 300 000 est minime. Notre production journalière en divers obus usinés à fabrication délicate, dépasse 100 000. La fabrication de 300 000 obus ne représente que quelques jours de production totale ; d'ailleurs les torpilles seront fabriquées par des usines qui chôment à l'heure actuelle. Au point de vue explosif, le problème sera plus délicat mais néanmoins soluble. Pour charger 300 000 obus, il faudra 1 200 tonnes d'explosifs ; cela représentera deux mois d'économie à 20 tonnes par jour ou bien la consommation d'un mois de matériel de 68[587] ».*

L'artillerie de tranchée était particulièrement adaptée aux combats rapprochés dans des environnements particuliers investis par la guerre : la montagne et la forêt. Les trajectoires paraboliques des tirs permettaient d'atteindre leurs objectifs sans percuter les arbres et le relief. Cet armement fut ainsi largement employé en Argonne et dans les Vosges.

Figure 101 : Bombardement par des projectiles de tranchées d'une ligne de défense de fils de fer barbelés[588].

[587] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Évaluation des besoins par le Ministère de la Guerre (1915). Une solution à la question des explosifs. Non signé.

[588] *Library and Archives Canada, MIKAN 3522015.*

4.3.3 Se battre sous terre pour prendre le dessus sur terre. La guerre de mines

« Vor der Hacke ist es duster [589]», proverbe de mineur allemand.

Principes et objectifs de la guerre dans la lithosphère

La Première Guerre mondiale fut une guerre d'un genre nouveau car totale, se gagnant ou se perdant au front comme à l'arrière. Elle investit aussi tous les compartiments de l'environnement : on se battit sur terre, sur mer, sous les mers, dans les airs, en montagne…et sous terre. Une guerre se livra dans la lithosphère. Cette confrontation souterraine prit le nom de « guerre de mines » et fut une des alternatives retenues par les Etats-Majors pour espérer dès 1915 rompre localement le front. Cette guerre souterraine était pour la tranchée ce que le sous-marin était pour le *Dreadnought*[590], c'est-à-dire une intention de briser la cuirasse par l'apposition la plus discrète possible d'une forte charge explosive sous les canons adverses. La guerre de mines ne visait pas uniquement la destruction du point visé.

Il s'agissait avant tout d'ouvrir une brèche en créant chez l'ennemi par la stupeur générée par des explosions cataclysmiques, et l'effet de surprise (surprise du lieu et du moment), un mouvement de panique, durant lequel l'assaut des fantassins pouvait être donné avec des espoirs de succès. Les énormes cratères (entonnoirs) ouverts par ces explosions souterraines constituèrent aussi des refuges aux soldats lors de leur progression vers l'ennemi.

L'attaque souterraine offensive était clairement une tactique de préparation de l'assaut en surface, utilisée par toutes les parties belligérantes pour palier (entre 1915 et 1917) à l'insuffisance de la puissance de feu et du pouvoir de destruction délivrés par l'artillerie lourde. Elle permettait aussi de détruire des points durs comme des blockhaus et autres nids de mitrailleuses.

Secteurs ciblés par la guerre de mines

Elle fut mise en application dans certains secteurs clés du front occidental considérés comme difficilement prenables par la surface et les moyens traditionnels de l'Infanterie et de l'Artillerie, en particulier certaines hauteurs (buttes et collines parfois minimes comme *Hill 60*[591] en Flandre occidentale) jugées comme stratégiques (comme celle de Vauquois, aux Eparges en Meuse) pour l'observation et la direction de l'Artillerie, ou des « points durs » des fortifications (comme les blockhaus français à Ammerzweiller dans le Haut-Rhin). La présence de terrains meubles « creusables » et de reliefs étaient aussi propices à la conduite d'une guerre de mines. Les chantiers souterrains de guerre de mines à La Chapelotte (Badonviller, version vosgien et gréseux du massif des Vosges, département de la Meurthe-et-Moselle) furent les seuls à avoir été conduits dans des roches très indurées (Grès vosgien et Conglomérat principal).

1914-1918. Le climax d'une tactique obsidionale anciennes

Là rien d'innovant pourtant car il s'agissait d'une tactique obsidionale ancienne mise en œuvre dès l'Antiquité, puis théorisée par celui qui savait construire des fortifications, le mieux à même de les détruire, Sébastien Le Prestre, marquis de Vauban, dit Vauban, au XVIIIe siècle. Mais cette tactique fut déclinée durant la Première Guerre mondiale à une échelle et une violence jusqu'alors inédites.

---

[589] « Il fait toujours sombre devant la pointe du pic ».

[590] Ancêtre du cuirassé, navire de guerre doté de canons en tourelles.

[591] La bataille de la colline 60 (*Hill 60*) se déroula du 17 avril au 7 mai 1915 entre les troupes britanniques et allemandes au lieu-dit *Hill 60* au sud-est d'Ypres et faisant largement appel aux tactiques de la guerre souterraine. Il en fut de même pour la colline voisine de Caterpillar.

Il fallut attendre l'explosion atomique au champ de tir expérimental d'Alamogordo (Nouveau-Mexique, USA) en juillet 1945 pour que la puissance des détonations de l'attaque britannique souterraine par la mine dans le Saillant d'Ypres (totalisant 450 tonnes d'explosifs) du 7 juin 1917 soit dépassée. Par ailleurs, la guerre de mines fit appel paradoxalement, à des techniques de creusement les plus rudimentaires et à des moyens d'écoute, de surveillance de l'ennemi à la pointe du progrès technologique[592]. Les attaques par la mine furent particulièrement violentes en 1915, aux Eparges, en Argonne (secteur de La Haute-Chevauchée), à Vauquois (département de la Meuse). La Butte de Vauquois fut ébranlée par plus de 500 détonations souterraines, explosions, qui, en Argonne, s'étendirent sur un front de près de 3,5 km. Avec 120 m, les systèmes de galeries de guerre de mines de La Chapelotte détiennent le record de la profondeur.

La guerre des tunnels fut employée comme tactique dans de nombreux conflits modernes (Vietnam, etc.) et contemporain (Palestine, etc.). La tactique fut remise au goût du jour à la faveur de la guerre civile en Syrie, notamment à Ydlib[593], pour défaire des casernements et points durs défensifs. Dans cette guerre du pauvre, nul besoin de moyens de haute technologie, mais pelles, pioches et main d'œuvre humaine.

Tactiques de la guerre de mines

La conduite de la guerre de mines suivit une tactique à la fois offensive et défensive.

Le principe de la tactique offensive était simple. Faute de progresser en surface, on tenta de progresser sous terre, bien à l'abri des regards et des soupçons de l'ennemi en creusant des galeries de plus en plus étroites jusque sous les objectifs adverses (cf. Figure 102).

Différents moyens de creusement furent utilisés selon la nature des terrains et le degré de discrétion recherché (pelletage / piochage manuel, perforateur pneumatique ou électrique, etc.). Les gravats étaient évacués à dos d'homme ou par des wagonnets. Toujours dans un souci de discrétion, les déblais acheminés à l'extérieur étaient parfois camouflés. Les galeries étaient généralement étayées par des cadres en bois et dotées de systèmes d'éclairage et d'aération. Des descenderies (rampes inclinées) ou des puits (verticaux) permettaient de gagner rapidement de la profondeur.

A l'aplomb de l'objectif visé, les galeries d'accès étaient ramifiées. Des chambres (cavités) étaient alors creusées à l'extrémité de certains rameaux pour y placer de fortes charges explosives (« fourneaux »). Après quoi, les rameaux étaient partiellement remblayés (une opération dénommée « bourrage »)[594] pour diriger le souffle de l'explosion à la verticale vers l'ennemi et non à l'horizontale dans ses propres galeries qui venaient d'être creusées. Le chantier souterrain un fois remblayé et évacué, les détonations étaient déclenchées par un dispositif d'allumage électrique depuis la surface et une tranchée (généralement des secondes ou troisièmes lignes), après que les montres entre commandements de l'Infanterie, se préparant à l'assaut, et ceux des unités du Génie, déclenchant les explosions, eussent été synchronisées. Le succès de l'opération reposait donc sur la discrétion du creusement, sur le calcul juste des charges à apposer pour obtenir en surface l'étendue et le degré de destruction escomptés, et sur la bonne synchronisation entre charge d'Infanterie et les mises à feu par le Génie.

---

[592] Géophones et sismographes furent créés à cet effet.

593 https://www.youtube.com/watch?v=u3Fh8Afn0fw

[594] Pour faire en sorte que la détonation se propage à la verticale et non dans les galeries que son propre camp venait de creuser.

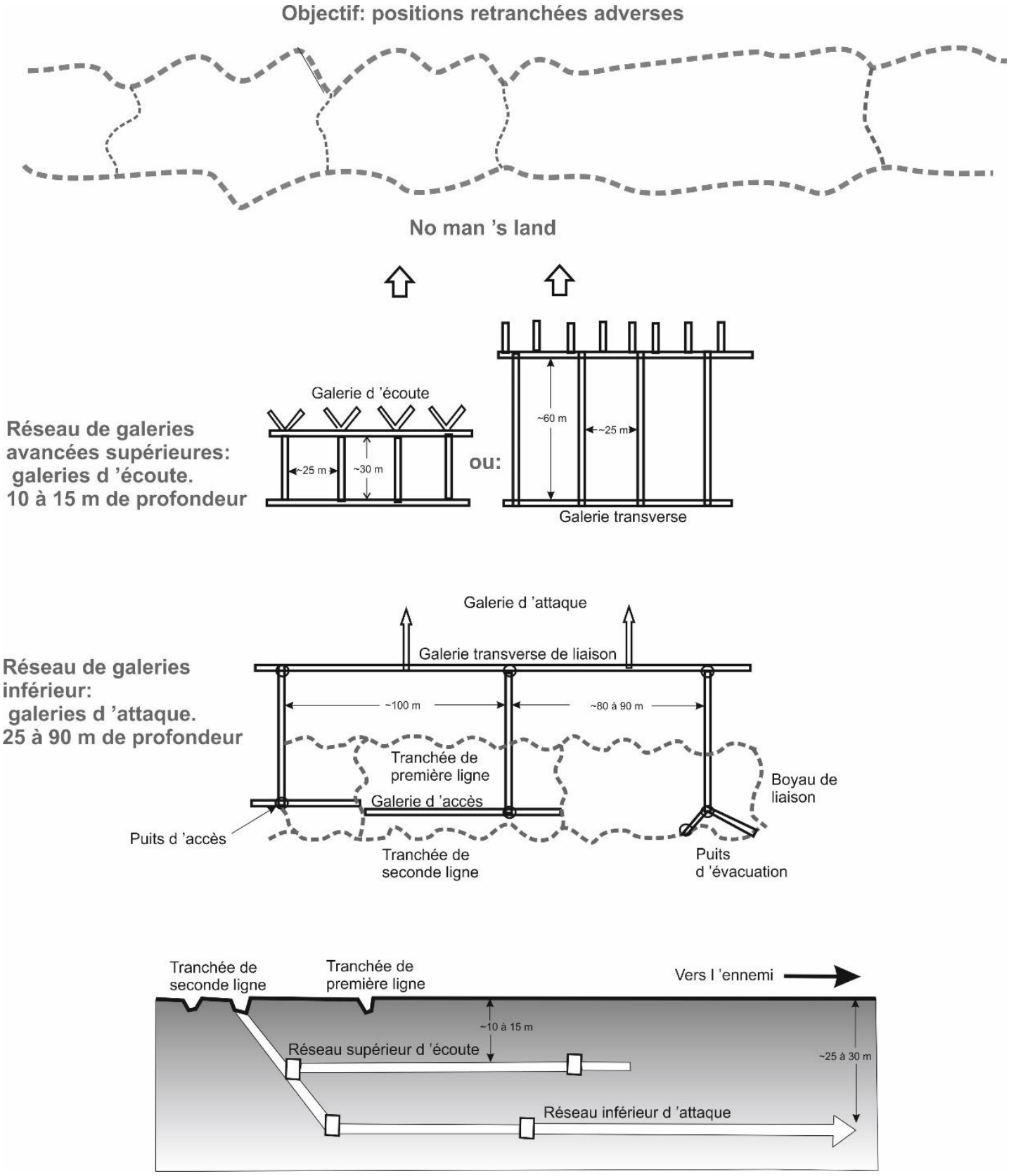


Figure 102 : Organisation des réseaux de mines de sapes étagés (systèmes allemands)[595].

[595] Hubé, D. (2016), inspiré de Kranz, W. (1936). *Schema deutscher Minierkampfanlagen (1916).* Skizze 10.

Les géologues conseillant les militaires, se dotèrent de règles de calcul pour estimer les charges à apposer en fonction du type de roche à faire exploser, la profondeur et l'étendue des destructions attendues en surface (diamètre des entonnoirs)[596]. La Figure 103 montre l'évolution des détonations souterraines vers la surface et la genèse des entonnoirs de mine.

Si en surface le terrain dicte sa loi, sous terre, la géologie est maîtresse. Dans les armées allemandes et britanniques les *Pionniere* et *Tunnellers* furent aidés dans la conduite de leurs travaux de mine par les spécialistes du monde souterrains, les géologues[597]. Deux d'entre eux s'illustrèrent : Walter Kranz côté allemand, aidant les manœuvres des *Pionniere* du Commandant Otto Füsslein en Flandre, face aux *Tunneller* du lieutenant-colonel Sir John Norton-Griffiths conseillé par le géologue, et explorateur polaire[598] australien, Tannatt William Edgeworth David.

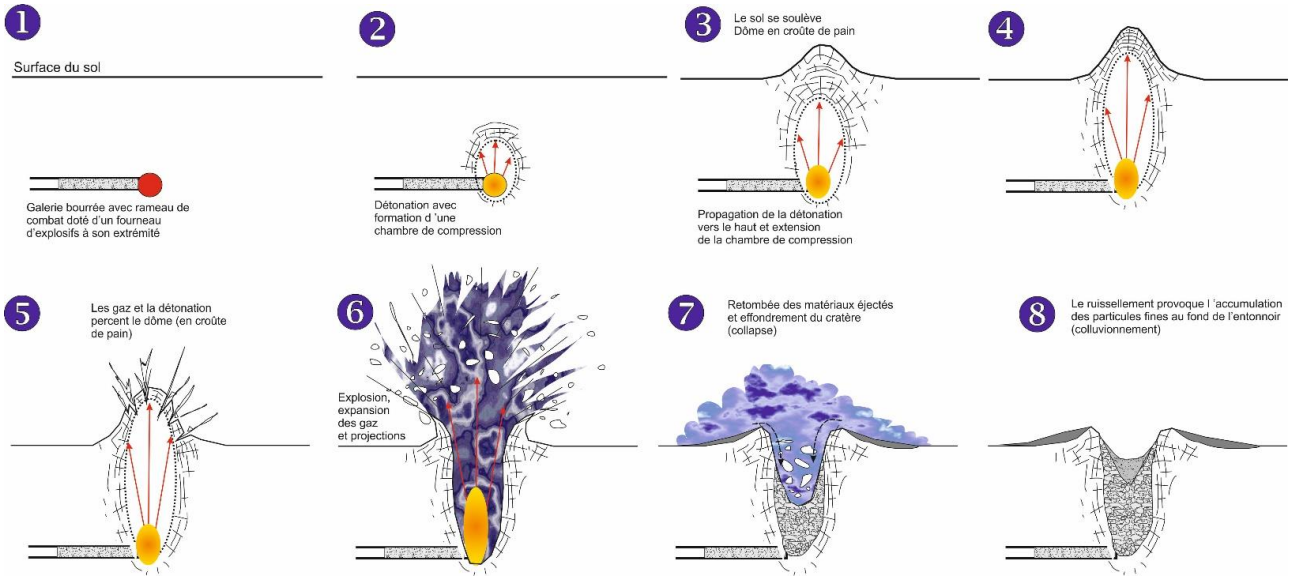


Figure 103 : Propagation de la détonation souterraine d'un fourneau de mine.

La tactique défensive fut l'usage de contre-mesures visant à contrer et neutraliser les attaques de mines offensives menées par l'ennemi. Les galeries étaient alors creusées en direction du chantier hostile, grâce à d'ingénieux dispositifs et méthodes d'écoute permettant de les localiser assez précisément. L'objectif était de progresser à une profondeur supérieure à celle des galeries adverses pour venir placer sous elles des charges explosives au moyen de rameaux ou de forages.

Ces charges étaient actionnées provoquant l'écrasement et la destruction du chantier visé. Le terme allemand de *Quetschmine*[599] est particulièrement parlant sur l'objectif des contre-mines (cf. Figure 104). Le terme français de « camouflet » est resté dans le langage courant. Sur le plan purement technique, il s'agissait de charges souterraines sans effets en surface (absence d'entonnoir). Ainsi dans la guerre de mines « prend le dessus celui qui sait prendre le dessous ».

---

596 Willig, D. Rose, E., Heyse, I., Allersmeier, C., Doyle., P. (2015). *Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4. Erlaüterung der Deutschen Spreng-Formel (Kranz, 1935b). p. 117. L.L.R. « Line of Least Resistance »*. p. 121.

597 Hubé, D (2017) *1914-1918, Tremblements de guerre*, *op. cit*.

598 Encore surnommé le « Chevalier au chapeau brun », il joua un rôle de prime importance dans la seconde expédition britannique dans l'Antarctique conduite par Ernest Shackleton en 1907, durant laquelle il dirigea la première ascension réussie du mont Erebus, le seul volcan actif en Antarctique.

599 Mine de coincement, d'écrasement.

L'objectif défensif était aussi de générer des entonnoirs en surface pour faire obstacles aux mouvements et troupes (comme en Argonne) ou de piéger les chars. La première contre-mesure à l'encontre des Allemands fut déclenchée le 11 décembre 1914 par les Britanniques qui firent exploser leur première mine à Festubert (département du Pas-de-Calais).

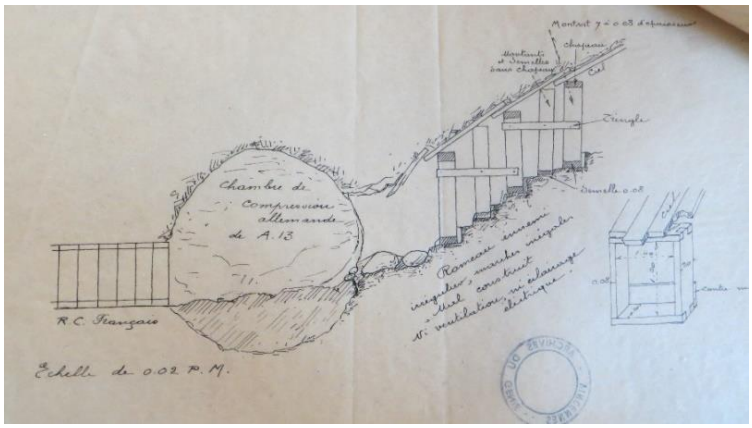


Figure 104 : Cliché exceptionnel d'une chambre de compression générée par le fonctionnement d'un camouflet (à gauche) dans le secteur de La Haute-Chevauchée en Argonne[600], et document d'archive datant de 1917 montrant la rencontre sous terre, involontaire et inopinée, le 30 septembre 1917 d'une galerie française (venant de la gauche) et allemande (venant de la droite). Cette rencontre inopinée donna lieu à des échanges de tirs entre sapeurs-mineurs des deux camps. Secteur de la Fille morte en Argonne[601].

Evolution des tactiques et systèmes de guerre de mines durant la guerre. La course à la profondeur et à la puissance

Au début de la guerre, les galeries de sapes étaient purement défensives et ne servaient qu'à progresser à couvert vers l'ennemi ; elles étaient à ce moment-là peu profondes, couvertes que de 20 à 50 cm de terre et de rondins de bois, disposés de façon discontinue pour permettre à la lumière de pénétrer, l'air de rentrer et de lancer des grenades vers l'ennemi lors d'attaques. A l'extrémité de ces tranchées couvertes, les sapeurs procédaient au forage en diagonale de trous, de plus de 19 mètres pour être chargés d'explosifs à proximité des fortifications ennemies. Les Allemands lancèrent une attaque foudroyante de ce type fin novembre 1914. La première explosion de mine à l'extrémité d'une galerie creusée à cet effet date du 1er octobre 1914, en forêt d'Argonne, et fut l'œuvre des Français. En réponse, les Allemands firent de même le 6 décembre 1914. La première confrontation sous terre entre Allemands et Français eut lieu au village de La Boisselle, au nord d'Albert (département de la Somme) en décembre 1914.

Les belligérants creusaient donc les uns en direction des autres pour se surprendre, pour détruire les chantiers souterrains et se libérer de la menace d'une explosion. Les attaques et opérations de contre-minage étaient répétées parfois sur un même objectif. Les terrains défoncés, broyés, par les détonations souterraines, mines comme camouflets, étaient évités, car impraticables au creusement en toute sécurité. Le creusement s'effectuait par le dessous ou par les côtés.

Ainsi lorsque les états-majors s'obstinèrent pour prendre des positions par la mine, les chantiers non seulement s'approfondissaient mais prirent aussi des dimensions phénoménales. A Vauquois (département de la Meuse), rien que du côté allemand, un réseau de plus de 35 km de galeries, abris, casernements souterrains fut creusé, s'enfonçant jusqu'à 90 m de profondeur.

---

600 Communication personnelle, Guillaume Jacquinet.

601 Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Le Chef de bataillon Frossard. Commandant le Génie de la XXVe Division à Monsieur le Général Commandant la 25e Division. Compte rendu. Le Ier octobre 1917.

A La Chapelotte, dans les Vosges gréseuses (département de la Meurthe-et-Moselle), l'un des rares chantier de mine ouvert dans une roche dure, le réseau étagé (cinq niveaux) fut porté jusqu'à 120 m de profondeur. L'approfondissement des chantiers de guerre de mines exigeait parfois d'avoir à creuser sous le niveau de la nappe phréatique. Pour cela des galeries de drainage étaient foncées et/ou des dispositifs d'exhaure (pompage) étaient mis en œuvre pour rabattre la nappe et maintenir les creusements au sec.

La course à la profondeur fut aussi en corollaire celle à la puissance des charges pour espérer provoquer des destructions et entonnoirs en surface. De quelques kilogrammes au début de la guerre, ces charges pouvaient être portées à plusieurs dizaines de tonnes d'explosifs puissants, différents chez les parties belligérantes. A Vauquois, une charge de 60 tonnes fut déclenchée en mai 1916 contribuant à éventrer la butte, là où avant-guerre se tenait un paisible village. 519 explosions pulvérisèrent son sommet, laissant une enfilade d'énormes entonnoirs béants encore visibles de nos jours. Les moyens humains et matériels déployés pour mener la guerre de mines furent sans aucune commune mesure avec les résultats obtenus. Les officier français du Génie œuvrant pour cette guerre sous terre dans l'Argonne depuis 1914 s'interrogèrent vers 1917 sur la futilité de ce travail titanesque de sapes : à quoi bon cette débauche d'énergie ? La guerre souterraine fut poursuivie jusqu'à son épuisement sous le prétexte que l'ennemi en faisait autant.

The Big Idea[602] du 7 juin 1917.

Le coup d'éclat de la guerre de mines fut celui du 7 juin 1917, en Belgique, en Flandre occidentale, lors de la bataille de Messines, une opération souterraine qui resta la plus ambitieuse et la plus réussie des opérations de ce type. Les Britanniques décidèrent de préparer l'offensive par une attaque de mines de grande ampleur sous les positions allemandes établies dans la partie sud de la crête de Wytschaete-Passchendaele au sud-est de la ville d'Ypres jusqu'alors imprenable. Ce travail préparatoire aurait été entamé dès août 1915 par le 175e *Tunnelling Company* en creusant des mines profondes. Le IIIrd *Canadian Tunnelling Company* acheva les travaux en aménagement deux fourneaux. Une branche fut dirigée vers l'endroit aujourd'hui connue sous le nom de « *Caterpillar* ». 31 tonnes d'explosifs furent placées sous les pieds des Allemands et actionnés mais sans résultats décisifs. Les Britanniques prirent le dessus sur les *Pionniere* d'Otto Füsslein lorsque s'imposa à eux l'idée que le succès de l'opération résidait dans une parfaite connaissance de la géologie locale et qu'ils ne pouvaient plus se restreindre à celle, régionale, aussi connue des Allemands.

Les Britanniques firent des études en ce sens sous le feu. Ils attaquèrent alors sous terre là où les Allemands ne les attendaient pas, creusant les argiles de l'Yprésien sous les couches aquifères. Un coup de maître. Les Britanniques firent simultanément fonctionner le 7 juin 1917, au petit matin, ces mines parmi 19 autres sur un front de 16 km. 450 tonnes d'explosifs placées à l'extrémité des rameaux des galeries détonèrent quasiment simultanément.

Le géologue allemand W. Kranz était là et il vit tout. Il décrivit ce matin-là la scène d'effroi « *on vit 19 énormes roses aux feuilles rouges écarlates* » et « *d'incommensurables champignons s'élancer lentement mais avec majesté depuis le sol. Ils se séparèrent en un hurlement sourd les uns des autres, immédiatement suivi colonnes brillantes et multicolores et de fumée, des matériaux noirs volèrent au travers de la colonne de feu jusqu'au ciel, aucune détonation aigüe ne se fit entendre même à courte distance (…). Environ 45 secondes après la détonation, toutes les mottes de terre étaient retombées, mais dans les entonnoirs gémissants flamboyaient encore des flammes bleutée de gaz enflammés comme des feux-follets, et des nuages de fumée noires stagnaient dans l'air[603]* ».

---

[602] John Norton-Griffiths, cité dans Laforgerie, E., Weiss, J.F. (2013). *Les souterrains de la Première Guerre mondiale - Tome 1, Du creusement au témoignage*. Ysec Editions. p.17.

[603] Willig, D. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*. p.39.

L'onde de choc de ce séisme artificiel se fit ressentir jusqu'à Londres. Le plus gros des entonnoirs « Caterpillar –hauteur 59B » mesure 79 m de diamètre pour une profondeur de 15,5 m.

Cet épisode paroxystique de la guerre de mines fut porté à l'écran par le film « *Les commandos de l'ombre* » ou « *Beneath Hill 60* ». Ce film est inspiré des exploits d'Oliver Woodward (8 octobre 1885-24 août 1966), un Australien métallurgiste responsable du chantier sous la colline.

Déclin de la guerre de mines

La guerre de mines atteignit là son apogée, après quoi, cette activité déclina graduellement. A compter de 1917, force fut de constater que les brèches provoquées par de telles explosions étaient inefficaces car le front n'est plus tenu par les hommes mais par l'Artillerie. Les détonations souterraines étaient alors rares et défensives, les travaux étaient poursuivis afin d'entretenir les réseaux qui furent aussi dotés de dispositifs d'autodestruction pour prévenir l'éventuelle intrusion de troupes ennemies. Le 10 juillet 1917 la dernière mine britannique, chargée de quatre tonnes d'explosif détona. Les dernières attaques françaises de mine à la butte de Vauquois dateraient d'avril 1918. Les dernières tentatives de minage contre-offensif par les Allemands aux Eparges furent avortées par la progression surprise franco-américaine dans le Saillant de Saint-Mihiel à l'automne 1918.

De plus amples informations sur la tactique et l'historique de la guerre de mines sont rassemblés dans Willig, D. (2015)[604], Doyle, P (2017)[605] Hubé, D. (2018)[606], et Bergerat et al, . (2018)[607]. Les secteurs de guerre de mines de La Haute Chevauchée et de la butte de Vauquois en Argonne, ainsi que celui du col de La Chapelotte font l'objet d'un descriptif et d'un développement historique spécifiques dans le cadre de cette recherche (cf. Section 4e du présent manuscrit) dans la perspective d'étudier les conséquences environnementales actuelles de ces tactiques militaires.

4.3.4 La guerre chimique et l'escalade toxique

Objectifs tactiques de la guerre chimique

L'émergence de l'arme chimique fut consubstantielle à l'enlisement du front à la fin 1914, à l'échec des plans offensifs français comme allemands. Face à cet enlisement inattendu, de nouvelles tactiques et armes devaient être testées puis déployées à grande échelle pour réinitialiser le mouvement par des ruptures du front. L'arme chimique fut créée dans ce but et fut aussi envisagée comme un substitut à moindre coût aux explosifs pour enfoncer le front par l'Etat-major allemand lorsque fin 1914 la pénurie en munitions et en explosifs menaçaient dangereusement. L'objectif assigné à l'arme chimique était de faire sortir les combattants de leurs retranchements et les mettre hors de combat, et pour cela les harceler physiquement, psychologiquement, les fatiguer par tous les moyens. Concernant l'historique de la guerre chimique en 1914-1918, les travaux et publications d'Olivier Lepick[608] font référence.

---

[604] Willig, D. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*.

[605] Doyle, P. (2017). *Disputed Earth. Geology and Trench Warfare on the western front. 1914-1918*. Unicorn Publishing Group.

[606] Hubé, D. (2017). *1914-1918, Tremblements de guerre*, *op. cit*.

[607] Bergerat, F., Gaviglio, P., Gély, J.P., Ginsburger, N., Labourguigne, J., et al. (2018). *1914-1918, la Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental.* AGBP-COFRHIGÉO-SGN, 10, pp.480, *Mémoire Hors-série de l'AGBP*, 978-2-9550042-1-0.

[608] Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre chimique. 1914-1918*, *op. cit*.

D'autres publications et travaux, plus récents, s'attachent plus spécifiquement à l'historiographie des origines, productions et représentations de la guerre chimique avant et durant les deux guerres mondiales[609].

L'amorce de la guerre chimique ? Une question de sémantique

La guerre chimique resta avant 1915 anecdotique. Les Français s'étaient déjà distingués en 1914 par l'usage, en quantités réduites, de grenades chargées d'agents lacrymogènes à base de bromacétate d'éthyle. Les Britanniques avaient dès l'automne 1914 engagé des recherches sur l'usage, non de grenades, mais d'obus chimiques (notamment à base d'iodacétate d'éthyle, de chlorure de benzyle ou de chloracétone), motivées en cela par des informations provenant d'Allemagne sur des recherches similaires en cours. Elles ne donnèrent lieux à aucune application opérationnelle, le *War Office* et l'Amirauté britannique interdirent formellement l'utilisation de ces substances[610]. Winston Churchill, alors, jugea en effet « *qu'il n'était pas opportun d'introduire dans la guerre des méthodes qui seraient susceptibles de provoquer des représailles inhumaines de la part de l'ennemi* [611]». L'Allemagne se plia au lobby de la plus puissante industrie chimique du monde pour créer de produits agressifs qui dès 1914 chargèrent des obus d'artillerie de confection conventionnelle. 3 000 d'entre-deux, de calibre 105 mm, pilonnèrent les positions françaises près de Neuve- Chapelle en octobre 1914, avec sur le plan stratégique un effet nul. Les recherches se focalisèrent alors sur des agents lacrymogènes similaires à ceux des Français. En janvier 1915, 18 000 obus chargés par ce type d'agent toxique furent utilisés contre les Russes à Bolimow (en préliminaire aux actions engagées dans les Lacs de Mazurie). Les résultats furent là aussi décevants. Pourtant l'usage de ce *T-Stoff* ne fut pas abandonné. La chimie allemande semblait si en avance sur ses concurrents alliés qu'elle ouvrit ainsi la Porte de Pandore.

Le 21 février 1915, parut en France une notice sur les engins (grenades) suffocants destinée à accompagner leurs livraisons en première ligne pour contrecarrer les clauses de La Haye et justifier leur usage dans le respect du droit international « *Les vapeurs répandues par les engins suffocants ne sont pas délétères*[612] ».

Mais le GQG était persuadé de l'efficacité de ce type de munitions car le 17 mars 1915, 10 000 grenades supplémentaires et 10 000 fusées furent livrées au front, mais l'engin eut un tel succès que le Ministre de la Guerre renouvela sa commande le 30 mars, et demanda la livraison de 90 000 paires de lunettes destinées à la protection des assaillants. Ce même jour, un programme de fabrication ambitieux fut mis sur pied; il devait permettre la livraison d'un millier de ces grenades par jour, à compter du 19 avril 1915. Les troupes les réceptionnèrent à partir du 20 avril 1915. Durant l'été 1915, les autorités allemandes accusèrent les Français d'avoir enfreint les engagements pris lors de la signature de la Convention de La Haye et d'être responsable de l'escalade chimique.

Devant les protestations allemandes et internationales concernant l'usage d'engins chimiques par les Français sur le front, pointant la responsabilité de la France en ce qui concerne l'escalade chimique, la France reconnut officiellement en juillet 1915, contenir dans son arsenal des engins délibérément suffocants.

---

[609] Bretislav, F., Hoffmann, D., Renn, J., Schmaltz, F. (2017). *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences*, *op. cit*.

[610] Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre chimique. 1914-1918*, *op. cit*. p.60.

[611] Churchill, W. (1923). *World Crises,* Londres, Scribner, p. 72.

[612] *Le Temps*, « L'emploi des gaz asphyxiants », 15 juillet 1915, cité dans Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre chimique. 1914-1918*, *op. cit*. p 58.

Premières attaques massives par nappes de chlore gazeux dérivantes (avril 1915)

Les premières attaques chimiques d'ampleur étaient allemandes et procédèrent en suivant la tactique dite « de la vague dérivante ». Au printemps 1915, du 22 avril au 25 mai, les combats reprirent en Flandre occidentale avec la seconde bataille d'Ypres qui resta tristement célèbre car elle inaugura sur le plan opérationnel, la guerre chimique systématique, à grande échelle, qui jusque-là s'était limitée à l'usage d'engins et grenades irritantes et lacrymogènes. Alors que les Allemands concentrèrent leurs efforts sur le front de l'est avec l'offensive Garlice-Tarnow, ils décidèrent de tromper les Alliés et faire diversion par une opération militaire limitée à Langemark. Les Allemands installèrent entre Bixschoote et Langemark 5 730 bonbonnes renfermant au total 168 tonnes de dichlore gazeux (un oxydant puissant, létal) face aux positions ennemies et les ouvrirent toutes simultanément, une fois que les conditions météorologiques furent jugées favorables, le 22 avril 1915. La vague toxique dérivante, poussée par le vent, surprit une division territoriale française. Les soldats, pris de panique, se mirent à fuir. Les fantassins allemands tentèrent de profiter de cette brèche, mais n'avancèrent que précautionneusement, ce qui laissa le temps aux Canadiens de venir la colmater. Le bilan fit état de 15 000 hommes gazés, 5 000 morts, 5 000 prisonniers. Cette bataille réussit à déstabiliser les Alliés et les empêcha de détecter les déplacements des forces allemandes vers l'est. Deux « *Gasregiment* » furent spécialement créés pour mener ce type d'attaques.

Le 25 septembre 1915, dans le secteur de Loos (à proximité de Lille, département du Nord), les Britanniques utilisèrent à leur tour les gaz de combat avec des attaques par vagues dérivantes. Ces offensives se montrèrent trop complexes à organiser car totalement dépendantes des conditions météorologiques pour assurer leur succès, mais aussi risquées si le vent venait à tourner. Par ailleurs, les vagues dérivantes, nécessitaient des centaines de bonbonnes de gaz pour espérer obtenir des effets escomptés dans les positions retranchées adverses compte tenu des phénomènes de dilution atmosphérique naturels. Couteuse et risquée, cette tactique fut rapidement abandonnée, lui préférant celle de l'Artillerie chimique qui permettait de vectoriser les agents toxiques de guerre directement au coeur du dispositif ennemi.

L'Artillerie chimique

La conception des projectiles de l'Artillerie chimique dérivait directement de celles des engins conventionnels explosifs et rien, si ce n'était qu'un marquage extérieur à la peinture et quelques détails sur la fusée, ne permettait de distinguer une munition conventionnelle d'une munition chimique (cf. Figure 105). Grenades, projectiles de tranchée, obus d'artillerie de campagne et d'artillerie lourde (jusqu'au calibre 210 mm) furent chargés avec des agents toxiques agressifs (vésicants, suffocants, irritants, émétisants, sternutatoire, lacrymogènes, etc.) qui se diversifièrent durant la guerre, pour devenir toujours plus dangereux et sournois, par leurs effets différés (avec en particulier l'*Ypérite* (liquide), plus connue sous le nom de « gaz moutarde », suffocante et vésicantes, les phosgène et diphosgène (gaz suffocants)). Les Britanniques furent les seuls à développer un obus (dit « à double diaphragme »), comme l'obus de 114 mm chargé de *Chloropicrine* spécifiquement conçu pour la guerre chimique.

Toutes les parties belligérantes usèrent de l'arme chimique durant la guerre, rivalisant en ingéniosité que ce soit en agressivité ou en moyens de s'en protéger. Des recherches scientifiques et des essais « grandeur nature » sur des animaux (comme au polygone de tir de Fontainebleau par les Français et à *Hanlon Field* près de Chaumont par les Américains) furent menés par les chimistes et artilleurs de toutes les parties belligérantes afin d'optimiser la dispersion des toxiques à l'impact, d'accroître leur persistance, leur discrétion et leur agressivité et de surpasser les capacités des protections respiratoires de l'adversaire. L'importance de cette arme ne cessa de croître au sein des arsenaux des artilleries engagées durant la guerre. On assista au cours de la guerre à une « toxification » des moyens de l'Artillerie.

L'invention par les Allemands de l'obus à *Croix bleue* (*Blaukreuz Geschoss*), apparut sur le front en septembre 1917, est particulièrement illustrative de la fonction harcelante de l'arme chimique. Elle fut une réaction allemande à la capacité des Alliés à se protéger des toxiques de guerre suffocants. Les obus à *Croix bleue* renfermaient, coulées au sein de l'explosif, des fioles en verre (pour les calibres étaient de 77 mm courts et longs, 105 mm et 150 mm) ou des réservoirs en tôle (pour l'obus à *Croix bleue* de 210 mm) contenant des arsines émétisantes (chlorure et/ou cyanure de diphénylarsine) (cf. Figure 106 page suivante). Le 210 mm était l'obus chimique de plus gros calibre durant la Grande Guerre

Ces arsines étaient les seuls agents chimiques solides de la Grande Guerre. Lorsque la détonation se produisait, ces contenants et leurs contenus se pulvérisaient, les arsines formant de fins aérosols en suspension dans l'air qui traversaient les masques à gaz. Les arsines ainsi inhalées étaient de puissants agents émétisants (faisant vomir), sternutatoires (faisant éternuer) et lacrymogènes (faisant pleurer). Les combattants étaient ainsi contraints et forcés de retirer leurs masques les exposant alors aux tirs avec des agents suffocants. Par ailleurs, ces soldats étaient mis dans l'incapacité de viser et de tirer.

Le Tableau 16 donne un aperçu de l'évolution de l'apparition des principaux toxiques de guerre sur le champ de bataille durant la Première Guerre mondiale.

Figure 105 : Diversité des munitions d'artillerie allemande à chargement spécial et leur marquage distinctif de peinture[613].

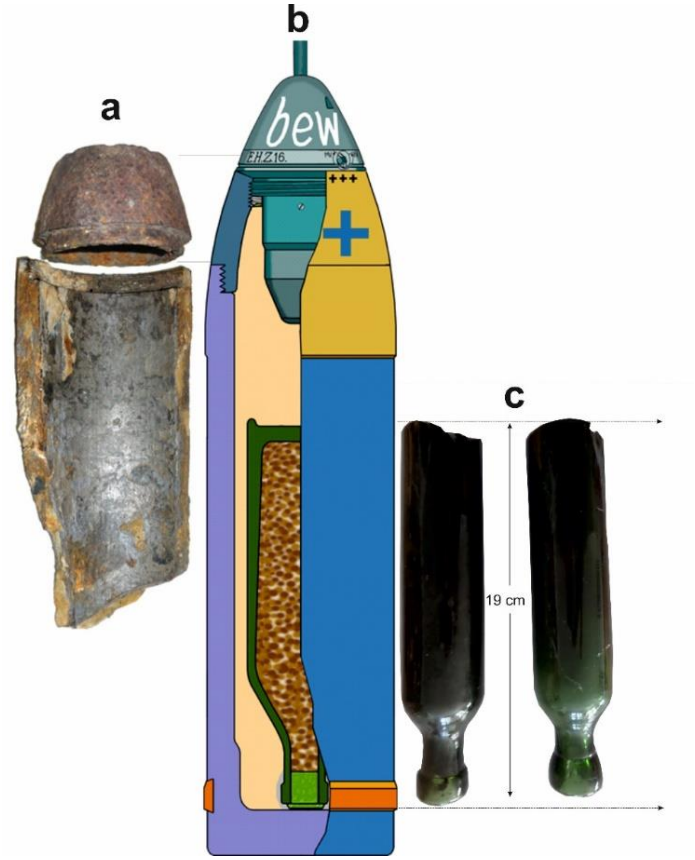


Figure 106 : Obus d'artillerie chimique allemand de 105 mm type Croix bleue, a) Eléments de munitions collectés sur le terrain, b) Ecorché, c) Fioles d'arsine en verre vert découvertes sur le terrain. Site de destruction de munitions chimiques dit de la «Place à gaz » en forêt de Spincourt, Gremilly (département de la Meuse)[614].

[613] *WWI Gas Shells of the German Army. Almanach Hachette, 1919.*

[614] Ecorché : Bélot, H. Communication personnelle. Fioles et fragments de munitions : Hubé, D. (2015).

Nom	Première utilisation	Type	Utilisé par
Bromure de xylyle	1914	Lacrymogène, toxique	A et E
Bertholite (chlore)	1915	Corrosif, irritant pour les poumons	A et E
Phosgène	1915	Corrosif, irritant pour les poumons, toxique	A et E
Bromure de benzyle	1915	Lacrymogène	E
Chloroformate de chlorométhyle	1915	Irritant pour les yeux, les poumons et la peau	A et E
Diphosgène	1916	Très irritant, provoque des brûlures	A et E
Chloropicrine	1916	Irritant, lacrymogène, toxique	A et E
Tetrachlorure d'étain	1916	Très irritant, provoque des brûlures	A
Iodoacétate d'éthyle	1916	Lacrymogène, toxique	A
Bromoacétone	1916	Lacrymogène, irritant	A et E
Bromométhyl éthyl cétone[51]	1916	Lacrymogène, irritant	E
Acroléine	1916	Lacrymogène, toxique	A
Cyanure d'hydrogène (acide prussique), acide cyanhydrique (*Vincennite*)	1916	Toxique, provoque l'asphyxie	A
Sulfure d'hydrogène	1916	Irritant, toxique	A
Adamsite (triphénylarsine)	1917	Irritant, lacrymogène	E
Chlorure de benzyle	1917	Irritant, lacrymogène	E
« Gaz moutarde », *Lost*, *Ypérite* (sulfure de dichloréthyl)	1917	Vésicant, irritant pour les poumons	A et E
Bis(chlorométhyl)éther	1918	Irritant, peut brouiller la vision	E
Éthyl dichloroarsine	1918	Vésicant	E
N-éthylcarbazole	1918	Irritant	E

Tableau 16 : Apparition des agents de combat sur le champ de bataille durant la Première Guerre mondiale[615] (A = Alliés, E = Entente).

L'escalade toxique de la guerre chimique

Un pourcentage de 4 à 5% est communément retenu pour qualifier la proportion des engins chimiques au sein des arsenaux durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental. Mais il ne s'agit que d'une moyenne. Premièrement, l'Artillerie chimique ne fut réellement opérationnelle qu'au dernier trimestre 1915. Deuxièmement, la proportion des munitions chimiques dans les arsenaux n'eut de cesse d'augmenter durant le cours de la guerre dans l'Artillerie de toutes les parties belligérantes, mais de façon plus prononcée encore au sein de l'armée allemande.

[615] D'après Lejaille, A. (1999). *La contribution des pharmaciens dans la protection individuelle contre les gaz de combat durant la Première Guerre mondiale - Extension à la période 1920 -1940*, *op. cit*.

Cette progression se serait encore poursuivie si les engagements militaires s'étaient étendus à 1919 « *Gas shells grew from a negligible proportion of artillery ammunition in 1915 to about 50% of the German, 35% of the French, 25% of the British, and 20% of the American ammunition expenditure by the Armistice. Had the war continued into 1919, all the belligerents planned to employ even more chemical shells*[616] ». Johnson (2017) précise que cet état de l'arsenal allemand en 1918 était une conséquences des difficultés rencontrées par l'industrie allemande à la fin de la guerre d'avoir à livrer aux armées des engins explosifs soumis aux pénuries en matières premières dans un contexte d'un approvisionnement en toxique de guerre bien plus aisé « *[…] this reflected German limitations in producing high explosives as much as their ability to produce chemical weapons*[617]*. By late 1918, total Allied shell production (all types) was twice that of the Germans, and the American mobilization was about to eliminate even the German advantage in chemical warfare*[618] ». Cette hypothèse semble réaliste au regard des résultats de cette recherche à la fois historique et analytique sur la chimie des poudres et explosifs qui montre à quel point la filière du chargement en projectiles explosifs fut mise en Allemagne sous tension à la fin de la guerre, contraignant l'Allemagne à user des déchets de production d'explosifs pour charger les projectiles de tranchée (cf. Section 1h). La production française en matière d'agents toxiques de guerre quant à elle progressa jusqu'à la fin des hostilités pour atteindre fin juin 1918 une moyenne journalière de 90 tonnes.

Les armées allemande et française optèrent pour deux stratégies de chargement et d'approvisionnement des munitions à chargements spéciaux (chimiques, incendiaires) radicalement différents. En France, le chargement des projectiles en agents chimiques de guerre s'effectua de façon très centralisée à l'arrière dans les ateliers des forts de Vincenness (département Val-de-Marne) et d'Aubervilliers (département de la Seine-Saint-Denis), complétés en 1918 par ceux de Pont-de-Claix et Salaise-sur-Sanne, Roussillon (département de l'Isère) dédiés essentiellement au chargement d'*Ypérite*. Une fois chargés, ces projectiles étaient acheminés vers les dépôts de l'Artillerie puis vers le front.

Les Allemands possédèrent aussi des ateliers de chargement militaires centraux destinés à l'approvisionnement de l'Artillerie chimique sur le front occidental, à Berlin (Adlershof, *Feldmunitionsanstalt 3*) et à Breloh *(« Gasplatz » Feldmunitionsanstalt 4*). Mais, à partir de mars 1916, l'efficacité surprenante des obus français de 75 mm au phosgène incita l'Artillerie allemande à demander de grandes quantités d'obus à gaz.

Pour satisfaire ces besoins imprévus, l'Administration de la guerre se décida à créer par ses propres moyens, une installation spéciale pour la fabrication intensive des obus à *Croix verte* (au phosgène), dont la mise en œuvre avait été décidée. Comme les militaires allemands n'avaient pas confiance dans la durée de conservation de ces chargements, ils fixèrent l'emplacement du nouvel atelier au voisinage du front, en vue de réduire au maximum le moment entre le remplissage et le tir du projectile.

---

[616] Spiers, Edward M. (2017). « The Gas War, 1915–1918: If not a War Winner, Hardly a Failure » In *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences*. Bretislav, F., Hoffmann, D., Renn, J., Schmaltz, F. Martin Wolf Editors, *op. cit*. p. 153.

[617] Johnson, J. A. (2017). « Military-Industrial Interactions in the Development of Chemical Warfare, 1914–1918: Comparing National Cases Within the Technological System of the Great War » In *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences*. Bretislav, F., Hoffmann, D., Renn, J., Schmaltz, F. Martin Wolf Editors, *op. cit*. p. 144

[618] Johnson, J. A. (2006). « Technological mobilization and munitions production: Comparative perspectives on Germany and Austria ». In *Frontline and factory: Comparative perspectives on the chemical industry at war, 1914–1924*, *op. cit*. p.

Le *Feldmunitionsanstallt 1* de Saulnes, dans le département de la Meurthe-et-Moselle, sur la frontière luxembourgeoise (bassin de Briey), succéda en 1917 à celui initialement installé à Mancieulles Val de Brey dès 1915 (*Kdo Pionnierregiment 35* (1915), puis *Feldfacharbeiterkompanie* (jusqu'en septembre 1916) devenu *Feldmunitionsanstallt 1* jusqu'en 1917)[619]. Le parc de Mancieulles expédia aux armées, au cours de l'année 1916, 848 000 obus à *Croix verte*.

Les Américains de l'AEF qui prirent possession des positions allemandes en Meuse et dans l'Aisne en 1918 établirent des inventaires et des statistiques méticuleux sur la composition des dépôts de munitions ex-allemands et documentèrent aussi la typologie des attaques adverses usant de l'artillerie chimique durant les combats. Ils rendirent compte de l'importance prise par l'arme chimique dans l'artillerie allemande. Ces documents sont exceptionnels de par leur précision renseignant clairement ce qui constitua les dépôts de munitions allemands de 1918. Les artilleurs américains notèrent ainsi que les tirs adverses par séquences de tirs de barrages roulants (« *Rolling barrage. High explosive 20%, Blue Cross 70%, Green Cross 10%* ») et de barrages rampants contre l'infanterie (« *Creeping barrage against infantry. High explosive 60%. Blue Cross 30%. Green Cross 10%* ») comportaient une forte proportion de munitions chimiques[620]. Parmi les engins chimiques ces Américains relevèrent que les séquences de tir combinaient des engins explosifs à ceux à chargement suffocants, vésicants (*Croix jaune, Croix verte*) et émétisants (*Croix bleue*). L'analyse qui résultait des statistiques des attaques chimiques allemandes, exposée dans le document *Artillery Gas Attacks – American Army. Division Gas Officer. Chief of Chemical Warfare Service*. *Headquarters seventh Division. Americal Expeditionary Forces, France daté du 5 février 1919* débouche sur une conclusion. En résumé « *At the time of armistice, the Boche were using Yellow Cross 40% Green Cross 40% Blue Cross 20%*[621] ». On notera ici l'importance prise au sein de l'artillerie allemande par les projectiles arséniés à *Croix bleue* qui constituaient de toute évidence une caractéristique de l'arsenal allemand de la fin de la guerre, dont les effets devaient être couplés à ceux d'agents suffoquants et vésicants. Ces statistiques documentées par l'AEF, prise sous ce feu, convergent avec les renseignements relatifs aux productions de guerre en Allemagne.

Les quantités de munitions chimiques livrées par l'industrie allemande aux armées atteignit son apogée en 1918 et furent multipliées par plus de 18 entre 1915 et 1918. Les engins à *Croix bleue* était alors à la fin de la guerre le type de projectile chimique le plus produit constituant près de la moitié des engins spéciaux sortant des usines (cf. Tableau 17 page suivante).

[619] Belot, H. *Kampfstoffproduktion 1914 bis 1945*. Communication personnelle.

[620] National Archives, Washington D.C., cote RG120 NM-91-915 B93-94. From Division Gas Officer to Chief of Chemical Warfare Service. Artillery Gas Attacks – American Army.February 5, 1919.

[621] *Ibid.*

Type de projectile	1915	1916	1917	1918	Total
T-,B-,K-Stoff	1 000 000	0	0	0	**1 000 000**
Grünkreuz (Croix verte)	0	846 420	3 919 240	3 993 300	**8 758 960**
Gelbkreuz (Croix jaune)	0	0	2 119 640	4 475 120	**6 594 760**
Gelbkreuz I (Croix jaune 1)	0	0	60 000	417 500	**477 500**
Blaukreuz (Croix bleue)	0	0	4 905 060	9 810 119	**14 715 179**
Total	**1 000 000**	**846 420**	**11 003 940**	**18 696 039**	**31 546 399**

Type de projectile	1915	1916	1917	1918	Total
T-,B-,K-Stoff	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	**3,17%**
Grünkreuz (Croix verte)	0,00%	100,00%	35,62%	21,36%	**27,77%**
Gelbkreuz (Croix jaune)	0,00%	0,00%	19,26%	23,94%	**20,90%**
Gelbkreuz I (Croix jaune 1)	0,00%	0,00%	0,55%	2,23%	**1,51%**
Blaukreuz (Croix bleue)	0,00%	0,00%	44,58%	52,47%	**46,65%**
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	**100,00%**

Tableau 17 : Munitions chimiques livrées aux armées en Allemagne[622].

Une recherche dynamique et inventive pour tuer

La recherche sur de nouveaux toxiques de guerre se poursuivit aussi tout au long de la guerre. Les Alliés furent les premiers à mettre au point en 1918 deux nouvelles arsines aux effets redoutables.

L'*Adamsite* (dibenzo-1-chloro-1,4-arsenine, DM) fut développée par le chimiste américain Roger Adams (qui lui a laissé son nom) à l'Université de l'Illinois. Il s'agissait d'un agent irritant et émétisant dont les effets étaient plus durables que ceux des diphénylarsines allemandes.

La *Lewisite* (2-chloroethenyldichloroarsine) appartient, comme l'*Ypérite,* à la catégorie des vésicants, produisant des symptômes proches de ceux de l'*Ypérite,* mais plus sévères, cicatrisant moins bien, et qui surtout apparaissent quelques minutes après l'exposition en se développant sur plusieurs dizaines d'heures ensuite, handicapant immédiatement les victimes. Elle fut synthétisée par le chimiste de l'armée américaine Winford Lee Lewis. La cessation des hostilités survint avant que les Alliés purent utiliser ces nouveaux agents agressifs sur le champ de bataille européen.

4.4. INNOVATIONS MECANIQUES AU FRONT : CHARS ET AVIONS

4.4.1 L'apparition et l'essor de l'aviation de combat et des bombes d'aviation

En 1914, l'aviation était principalement dotée de matériels légers destinés à la reconnaissance. L'aviation de combat prit son essor à compter de 1915 et la guerre de position, puis s'affirma comme une arme jouant un rôle central dans les grandes batailles de la Première Guerre mondiale. A partir de 1916, l'aviation connu de profondes mutations sous l'impulsion de progrès technologiques. L'usage de l'aluminium permit de construire des avions plus robustes, la motorisation accentua la vitesse, notamment ascensionnelle, et l'agilité. Tout comme l'Artillerie et les armements au sol, l'Aviation se spécialisa : appareils de chasse, de reconnaissance et de bombardement.

[622] D'après Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges, op. cit.* p. 14.

La précision des tirs et des frappes aériennes s'améliora par l'invention des mitrailleuses synchronisées permettant de tirer à travers l'hélice, des viseurs de bombardement et de la radio.

La puissance des appareils augmentant, l'armement embarqué devint aussi de plus en plus lourd : les Allemands mirent au point et utilisèrent depuis leurs quadrimoteurs lourds *Gotha* des bombes pisciformes de 1 200 kg, les bombes les plus lourdes de la Première Guerre mondiale. Les ailes pliaient sous l'effet du chargement de bombes[623].

Les bombes d'aviation étaient des engins explosifs en général largués d'un aéronef, d'abord depuis des dirigeables (Zeppelin côté allemand) puis depuis des avions grâce aux progrès de l'aviation. Les bombes d'aviation présentaient de multiples formes et tailles. Généralement en métal, elles se caractérisaient par une forme habituellement aérodynamique, lisse et incurvée. Le corps en acier (ou en aluminium) était pisciforme (supersonique) ou cylindro-ogivale (subsonique) à faible trainée. Le corps comportait une ogive et un culot. Les bombes étaient d'abord rudimentaires, parfois faites d'obus classiques qu'on dota d'un empennage, que les pilotes larguaient manuellement depuis leur cockpit. Des fléchettes antipersonnel furent aussi larguées. Progressivement, les bombes spécifiquement dédiées aux bombardements aériens, en appui à l'Artillerie, placées sous les ailes ou la carlingue furent développées. A la fin de la guerre, les rayons d'action des bombardiers étaient tels que des bombardements stratégiques en territoire ennemi devinrent possibles.

La « *vieille éthique guerrière, disparue dans la boue des tranchées*[624] » trouva refuge dans l'arme la plus moderne de la Grande Guerre, par les combats chevaleresques des as du ciel qui fascinèrent l'opinion publique.

Les clichés de la Figure 107 page suivante donnent un aperçu de la diversité de la physionomie des bombes d'aviation de la Première Guerre mondiale.

[623] Communication personnelle et orale.

[624] Audoin-Rouzeau, S. (2004). *Avions et chars*, In *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914-1918. Histoire et culture*, *op. cit*. p. 264

Bombes suspendues sous un biplan Gotha G.V de la Luftstreikräfte en novembre 1917[625]

Bombe d'aviation britannique de type « Essen »[626]

Bombes d'aviation allemandes non explosées lors du bombardement aérien du 17 février 1918 au-dessus de Dieulouard à proximité de Nancy (département de la Meurthe-et-Moselle). Il s'agit de projectiles d'artillerie lourde transformé en bombes par l'adjonction d'empennages[627].

Récupération d'une bombe d'aviation allemande de 300 kg non explosées lors du bombardement aérien du 17 février 1918 de Nancy (département de la Meurthe-et-Moselle).[628].

Figure 107 : Bombes d'aviation. Aperçus photographiques.

---

[625] Bundesarchiv, Allemagne, Bild 146-1971-045-48. 1er novembre 1917.

[626] *Imperial War Museum, London, number Q 10376. Du nom de la ville allemande d'Essen (Ruhr) où se situent les* usines d'armement Krupp auxquelles ces bombes étaient destinées. Ces bombes n'auraient jamais servi (et la photographie serait le cas échéant une mise en scène). Mécaniciens du 207th Squadron RAF déplaçant sur un charriot une bombe lourde pour l'accrocher sous le bombardier de nuit Handley Page. Ligescourt, 29 août 1918. McLellan, David (Second Lieutenant) (photographe).

[627] Archives municipales de Nancy, cote FRAC54395_107_Fi_11.

[628] Archives municipales de Nancy, cote FRAC54395_8_Fi_259.

4.4.2 L'Artillerie spéciale mobile mécanisée. Une arme blindée décisive pour les Alliés dans la guerre de mouvement

1917 fut l'apogée du déploiement de l'artillerie lourde et de sa puissance de feu. Cette année là vit aussi l'affirmation opérationnelle, chez les Alliés, du char (l'armé blindée cavalerie (ABC) d'abord dénommée « Artillerie spéciale »). Entrés en scène sur le champ de bataille en septembre 1916, lors de la bataille de la Somme, pour tenter de limiter les pertes humaines, les premiers chars britanniques Mark I furent lancés à toute « vitesse réduite[629]» dans la mêlée à Flers-Courcelette. La bataille de la Somme fut la première bataille mécanique de l'Histoire. Ces chars lourds, lents, difficiles à piloter, à la mécanique capricieuse, restaient une cible facile pour l'Artillerie ennemie. Côté français, les chars lourds Schneider et Saint-Chamond vinrent appuyer les charges d'infanterie sur le Chemin des Dames en avril 1917 lors de l'offensive Nivelle. L'usage du char ne se montra conclusif ni côté britannique ni côté français. Ces échecs et résultats mitigés renforcèrent les convictions allemandes sur l'inefficacité de l'arme blindée mécanique au front et en corollaire la position de l'OHL de ne pas investir temps et argent pour la développer.

Beaucoup trop d'hommes étaient tombés à Paschendaele pour tenter de percer le front. Les Britanniques imaginèrent avancer et attaquer les lignes adverses sous la protection d'un blindage et limiter les pertes. La bataille de Cambrai (département du Nord) du 20 au 28 novembre 1917, lancée à l'initiative des forces Britanniques resta dans l'histoire militaire comme le premier engagement opérationnel à grande échelle de l'artillerie mobile blindée. 360 chars lourds Mark IV se lancèrent, précédés par une courte préparation d'artillerie et accompagnés par l'infanterie, à l'assaut des positions allemandes qui, surprises, durent amorcer un recul de 8 km, un mouvement jamais vu depuis 1914. Mais trop vulnérables et trop peu nombreux ces chars ne purent tenir face à une contre-offensive allemande ; les Britanniques ne purent consolider leurs avantages acquis. Les Allemands capturèrent aussi des blindés et s'en servirent, une fois affublés de la Croix de Fer. La bataille de Cambrai resta « *une expérience inédite de « matériel mis en mouvement* »[630] ».

Ces engins correspondaient d'abord et avant tout à des « cuirassés terrestres [631]», c'est-à-dire une pièce d'artillerie casematée et motorisée. Trop lourds, ces engins étaient aussi trop lents. Le constructeur automobile Renault proposa à l'armée, développa puis construisit à l'échelle industrielle en 1917 un char révolutionnaire, léger, rapide et doté d'une tourelle rotative, pourvu d'un canon court de 75 mm ou d'une mitrailleuse : le FT-17. Cet engin était l'ancêtre du char d'assaut moderne, un véhicule blindé, chenillé, autonome et armé. Ce blindé équipa les armées françaises et américaines.

Avec l'accroissement de la vitesse et de l'autonomie des chars, cette arme sortit des missions traditionnelles de l'Artillerie en accompagnant et soutenant l'infanterie dans sa progression tout en offrant un appui feu et moral aux fantassins, ce que ne pouvait réaliser l'Artillerie classique, moto- ou hypotractée, trop lourde et trop peu maniable sur des terrains accidentés par des tranchées et cratères d'obus. Le char devint un acteur majeur des percées alliées de 1918 et leur exploitation, un avantage dont les Allemands étaient dépourvus. Les Allemands n'oublièrent pas leurs erreurs et firent du char l'un des fers de lance de leur armée lorsqu'ils entrèrent en guerre à nouveau en Europe en 1939.

---

[629] Les chars lourds britanniques Mark 1 « mâle » ou « femelle », monstres de 30 tonnes, progressaient à 7 $km.h^{-1}$.

[630] Audoin-Rouzeau, S. (2008). « Combattre. Les batailles de la Grande Guerre ». In *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914-1918*, *op. cit*. p. 309.

[631] Satyavane, D. et Pommer, C. (2016). « De l'artillerie cuirassée au char de combat ». In *Un milliard d'obus, des millions d'hommes. L'artillerie en 14/18*, sous la direction éditoriale de Liénart éditions. Publié à l'occasion de l'exposition présentée du 21 mai au 5 décembre 2016 au musée de la Grande Guerre du Pays de Meaux. p. 129.

4.5. LES TACTIQUES DE L'ARTILLERIE ET LEURS EVOLUTIONS

4.5.1 Applications des tactiques interarmes dans la guerre de siège « l'Artillerie conquiert, l'Infanterie occupe »

Des séquences de tir et des tactiques interarmes misèrent sur les effets de saturation. Les assauts étaient ainsi « préparés » par de violents bombardements censés réduire les défenses adverses, broyer les réseaux de fils de fer barbelés, ouvrir des brèches, et assommer les troupes adverses, avant d'engager l'Infanterie, pour limiter les pertes. Ces bombardements, denses et ciblés, ne s'avérèrent pas toujours heureux, comme lors de la bataille de la Somme en 1916, où sur le Chemin des Dames en 1917, par la rupture de l'effet surprise d'une préparation trop longue dont l'intensité inhabituelle laissait présager une offensive d'ampleur.

Une fois l'assaut lancé, des séquences de tir étaient aussi dédiées à l'accompagnement de la progression des troupes vers les positions adverses. Il s'agissait des tirs de barrage. Dès août 1914, les Français eurent recours à cette tactique faite de tirs massifs sur un rythme continu (mêlant généralement des projectiles fusants et percutants). Défensifs, les tirs de barrage visaient à bloquer ou ralentir le passage des troupes adverses dans une zone défendue. Offensifs, ils servaient à neutraliser l'adversaire, à l'avant de la progression de ses troupes et accompagnaient le mouvement offensif en allongeant progressivement la portée de l'impact des obus ; ce barrage roulant[632] apparut au sein de l'artillerie française après la victoire sur la Marne, le 26 septembre 1914. Dès le début de l'année 1915, les Britanniques l'adoptèrent (sous le nom de *Creeping barrage* ou barrage rampant). Cette tactique était très consommatrice en munitions et risquées lorsque les tirs, trop peu précis, tombaient parmi ses propres hommes montés à l'offensive.

L'année 1915 se termina avec l'amer constat que les nouvelles tactiques, notamment interarmes, étaient inopérantes, les gains de terrain infimes au prix de lourdes pertes. Les armes et le matériel tenaient le front avec leur puissance de feu et leur potentiel d'attrition.

L'année 1916 fut avant tout marquée par deux grandes batailles majeures de la Première Guerre mondiale, celle de Verdun, défensive pour les Français, et celle de la Somme, offensive pour les Alliés. Inaugurées avec les assauts de 1915, notamment en Champagne, les préparations massives d'artillerie, faites de dizaines à centaines de milliers de tirs, préliminaires aux montées en ligne des troupes de l'infanterie, prirent durant ces deux batailles des magnitudes inédites.

4.5.2 1917. Changement de tactiques de l'Artillerie et de l'Infanterie

Forte de son expérience du combat dans la Somme, l'infanterie allemande modifia ses tactiques, tournant le dos aux tranchées et aux assauts massifs et frontaux au profit de «poussées », d'assauts en petits groupes manœuvrant rapidement et indépendamment pour prendre des objectifs restreints comme un saillant, un pont, un village ou encore « *afin de désorganiser le système établi du front adverse*[633]».

[632] Tactique qui consiste à faire avancer, devant la progression et en accompagnement de l'infanterie, un rideau d'impact de projectiles explosifs et fumigènes.

[633] Krumeich, G., Audoin-Rouzeau, S. (2004). « Combattre. Les batailles de la Grande Guerre », *op. cit*. p. 308.

Des troupes d'élite et de choc furent créées et spécialement formées à ces desseins: les *Stosstruppen* ou sections d'assaut. Ces hommes furent éloignés du front pour compléter leur formation et bien assimiler les instructions. Après les avancées de l'Infanterie derrière le *Trommelfeuer,* l'OHL misa sur l'autonomie des sections d'assauts n'ayant à répondre qu'aux ordres de chefs subalternes.

Figure 108 : Troupes d'assaut allemandes lors de l'offensive du printemps 1918[634].

La tactique était simple : mener des opérations commando pour infiltrer l'ennemi et neutraliser ses communications et commandements avant de lancer des charges d'infanterie généralisées.

En 1917, forts des enseignements des offensives passées, les états-majors modifièrent aussi leurs tactiques. La suprématie de l'Artillerie comme l'arme de rupture du front s'affirma, mais la tactique des tirs massifs de préparation de plusieurs jours, annonçant l'offensive, fut écartée. L'effet de surprise était privilégié et pour cela de nouvelles séquences de tirs inscrites dans le déploiement des opérations furent imaginées. La méthode du tir sans réglage consistait à utiliser une vaste gamme de calibres de projectiles dans des séquences de tir courtes, denses, massives, inopinées avec des changements d'objectifs d'apparence aléatoires, mais imprévisibles par l'adversaire. Ces tirs visaient le front comme les arrières lignes. Les Britanniques optèrent dès 1917 sur des préparations courtes mais violentes (dénommées *Hurricane Bombardements*[635]).

En 1917, puis en 1918, l'artillerie lourde à grande portée et grande puissance (pour l'essentiel des pièces de marine sur affût bétonné fixe ou mobiles sur voie ferrée) prit comme cibles militaires des points d'appui, gares et nœuds ferroviaires importants, nœuds de communication, des voies de ravitaillement, des parcs à munitions et certaines pièces d'artillerie sous abris. Ces frappes « en profondeur » avaient pour objectif d'abord de fragiliser les approvisionnements et la logistique alimentant le front. Les Allemands se servirent aussi de ces canons à longue portée, ceux de marine, comme des engins de terreur pour viser, harceler délibérément les civils en ville, briser le moral, faisant ainsi entorse aux traités de La Haye « *Des moyens inédits de dépasser la ligne de front apparaissent et permettent de viser directement les populations civiles, contribuant par là même à amoindrir la séparation entre la ligne de front et l'arrière du front*[636]».

Des villes comme Nancy, Belfort furent visées par des « *SLK*[637] *Long Max* » de marine de calibre 381 mm. En 1918, les Allemands mirent au point trois canons à très longue portée, capable de bombarder Paris depuis l'Aisne (forêt de Saint-Gobain, dans le secteur de Coucy-le-Château-Auffrique), à 120 km de distance.

---

[634] Imperial War Museum, number Q 47997. Geiser Theodore (Mons) collection.

[635] Zabecki, T. D. (1994). *Steel Wind: Colonel Georg Bruchmüller and the Birth of Modern Artillery*. Praeger Publishers Inc (8 décembre 1994).

[636] Bruttmann, T. (2020). « Victimes. Les civils entre combats et politiques de violence ». In *Mondes en guerre. Tome III. Guerres mondiales et impériales. 1870-1945*. Dirigé par André Loez. Passés / composés. Ministère des Armées.

[637] *Sehr Lange Kanone* (littéralement « très longs canons »).

Ces *Pariser Kanonen*[638] (ou ou *Parisgeschütze*[639]) (cf. Figure 109) étaient des « *SLK Long Max* » de marine de calibre 381 mm rallongés par deux tubes supplémentaires (pour une longueur totale de 36 m) se terminant au calibre 210 mm. Ils tiraient des obus de 210 mm (de 125 kg), propulsés par plus 150 à 200 kg de poudre selon la distance de la cible, chemisés entre 210 et 240 mm pour s'adapter à l'usure progressive du tube provoquée par l'effet d'arrachement des projectiles. Le tube était usagé puis ferraillé après 65 coups. Ces canons vectorisèrent un total de 367 obus sur Paris et les communes environnantes, entre le 23 mars et le 9 août 1918, causant la mort de 256 personnes. Ces obus étaient aussi les premiers objets confectionnés par l'Homme expédiés dans la stratosphère. « *Au total, l'artillerie lourde vint à dominer les différentes formes de tirs sur le champ de bataille, tirs dont il existait une très grande variété en fonction des objectifs tactiques poursuivis*[640] ».

Figure 109 : Le « Canon de Paris » 21/35 cm « Wilhelm Geschütze » de la forêt de Saint-Gobain et ses servants[641].

[638] Littéralement « Les canons de Paris ».

[639] Du côté français, ce canon est surnommé *Bertha* et *Grosse Bertha* dès son entrée en service. Mais les grosses pièces d'artillerie appelées *Grosse Bertha (Dicke Bertha)* par les Allemands sont de gros obusiers lourds Krupp de 420 mm de siège (pour détruire des fortifications) et d'une portée d'un peu plus de 9 km. La confusion vient de Français vivant à proximité des emplacements de tir des *Pariser Kanonen*, entendant les artilleurs utiliser le nom allemand, mais pour désigner une autre pièce d'artillerie.

[640] Audoin-Rouzeau, S. (2004). « Combattre. Artillerie et mitrailleuses ». In *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914 – 1918*, *op. cit*. p. 258.

[641] Collection particulière Général Jacques Guély - Les amis du Patrimoine de l'armement de Bourges.

1918. Tactiques pour une reprise de la guerre de mouvement. La violence des « ouragans de feu »

A la reprise de la guerre de mouvement au printemps 1918 à l'initiative des Allemands, les possibilités offertes « *permirent à l'arme chimique d'entrer dans une nouvelle ère*[642] ». Le quartier maitre E. Ludendorff crut en cette arme. En septembre 1917, Georg Bruchmüller (cf. Figure 110 ci-contre), testa en Pologne[643], sur le front est, une nouvelle tactique de l'Artillerie destinée à entraver toute velléité de riposte des Alliés en réponse aux charges de l'infanterie allemande dans le contexte d'une guerre ouverte de mouvement. Cette technique de la *Feuerwalze* était basée sur une combinaison savante de projectiles chimiques divers et explosifs (*Buntkreuzschiessen*[644]) lors de bombardements intenses sur des objectifs ciblés. En prévision des offensives du printemps, un approvisionnement en munitions selon un ratio obus conventionnels / obus chimiques de 50/50 pour les séquences de tir sur les lignes ennemies et de 20/80 pour les tirs de contre-batterie étaient prévus.

Figure 110 : Colonel Georg Bruchmüller (1863-1948). Rheinisches Fußartillerie-Regiment Nr. 8 von Preußen[645].

L'*Ypérite*, liquide visqueux et persistant chargeant les obus à *Croix jaune*, permit de polluer des lignes ennemies qui s'exposèrent, une fois les troupes sorties de leurs positions, au toxique dont les effets se manifestèrent 6 à 8 heures après une exposition sournoise, tout au plus signifiée par une légère odeur alliacée. Cet agent chimique trouvait dans la guerre de mouvement imaginée par les Allemands une application efficace pour contenir des ripostes. Une fois le barrage chimique dissuasif franchi, les tirs se poursuivirent au moyen d'obus à *Croix bleue* « *la partie la plus avancée du Feuerwalze était composée d'obus Croix bleue* [646]». Ces obus chargés d'agents émétisants, lacrymogènes, sternutatoires étaient destinés à incapaciter les combattants en les faisant vomir, pleurer et éternuer mais aussi à les rendre vulnérables aux agents suffocants vectorisés par les obus à *Croix jaune* et à *Croix verte* en les contraignant à retirer leurs protections respiratoires.

En 1918, les pièces lourdes, et en particulier l'ALGP (dont l'ALVF), se montrèrent progressivement inadaptées avec la reprise de la guerre de mouvement, la mise en batterie et le réglage du tir de ces mastodontes étant bien trop longs pour suivre l'évolution du front. Par ailleurs, ces canons offrirent des cibles privilégiées pour l'aviation de bombardement qui développa des frappes tactiques précises en piqué. Les Alliés leur préférèrent des pièces plus légères et surtout le char permettant d'accompagner par leur puissance de feu et leur manœuvrabilité tout terrain les fantassins.

---

642 Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre Chimique. 1914-1918*, *op. cit*. p. 245.

643 Malgré l'organisation d'attaques par vagues dérivantes au moyen de cylindre pressurisés par toutes les parties belligérantes, elles eurent aussi toutes recours à l'artillerie chimique, notamment en 1917, où Bruchmüller endossa le surnom de *Durchbruchmüller* (« Müller La Percée ») pour les assauts d'artillerie, avec l'usage de "gas squares" à Stochod, en Galicie de l'est, à Riga respectivement en avril et septembre 1917 (Spiers, Edward M. 2017).

644 Bombardements aux croix multicolores.

645 On the Importance of Bruchmüller. Roads to the Great War. 1914-1918- Arts – Literature – Imagery – Reflection 2014-2018. http://roadstothegreatwar-ww1.blogspot.com/2014/04/on-importance-of-bruchmuller.html

646 Lepick, O. (1998). *La Grande Guerre Chimique. 1914-1918*, *op. cit*. p. 248.

4.6. L'ESCALADE VERS UNE HYPERVIOLENCE GUERRIERE

« Mais quel fou rire, sous le masque. Blancheur éternelle d'ici. Où la colombe porte un casque. Et l'acier s'envole aussi[647]».

4.6.1 L'intensification des bombardements et du déploiement des moyens de l'Artillerie

L'accroissement de la densité des tirs et des moyens de l'Artillerie

L'Artillerie ne représentait qu'environ 1/5e des effectifs militaires engagés en 1914. Durant la phase de guerre de mouvement de 1914, orchestrée par l'Infanterie, l'Artillerie était reléguée au second plan, comme une arme secondaire de soutien, selon une doctrine théorisée par Von Clausewitz au XIXe siècle *« […] l'artillerie est la plus haute expression du principe destructeur et son mode d'action dans le combat se combine le mieux à celui de l'infanterie […]*[648]». En 1944, Charles De Gaulle dans son ouvrage *Le Fil de l'Epée* écrivit au sujet de la place de l'artillerie dans la doctrine militaire suivie lors des combats de 1914 « *[...] il suffisait de marcher sur l'ennemi pour le vaincre, le plus vite serait le mieux et il convenait de tenir pour accessoire tout ce qui n'était pas exclusivement la ruée en avant. Le feu devint un pis-aller. L'ouvrir était un dommage que l'on retardait le plus possible, l'entretenir était un péril car l'élan de la troupe pourrait s'y dissoudre* [649]». Cette arme était non seulement secondaire, mais aussi, selon cet officier gênante, pour la charge.

La Première Guerre mondiale ne fut donc pas d'emblée celle de l'Artillerie mais le devint, par la force des choses de la guerre de position. Cette arme s'affirma ainsi alors comme la seule capable de rompre un front qui se figea à l'automne 1914, par le recours privilégié aux postures défensives. L'augmentation du nombre de tubes entraîna une augmentation des personnels servants. « *Son matériel s'est accru dans les mêmes proportions en nombre d'unités de pièces* [650]». Les artilleurs représentaient en 1914 20% du personnel des armées contre 38% en 1918, avec en corollaire, mécaniquement, une diminution des personnels de l'Infanterie (passant de 70% en 1914 à 48% en 1918).

L'augmentation de la puisance de feu de l'Artillerie fut une conséquence de l'augmentation conjointe (i) du nombre de pièces engagées (ii) des cadences de tir et (iii) des calibres des projectiles tirés sur le théâtre des opérations. Pour illustrer cela, quelques chiffres relatifs aux bombardements de préparation paroxystiques de quelques grandes batailles qui marquèrent l'histoire de la Grande Guerre par l'importance de l'engagement de l'Artillerie sont présentés dans ce qui suit. Le matraquage par l'Artillerie, qui prit le nom de « Marmitage » au sein de l'armée française, était inégal selon les sections du front occidental et sur la durée de la guerre. Des secteurs dit « actifs » étaient intensément pilonnés, de façon répétée, alors que d'autres l'étaient de façon très sporadique et ponctuel (secteurs « calmes » du front).

La grande offensive de Champagne de 1915 inaugura l'usage massif de l'Artillerie pour préparer une offensive. Selon des officiers allemands, 2,6 millions d'obus de 75 mm et 520 000 projectiles de gros calibre furent tirés sur les positions françaises durant la période du 22 septembre 1915 au 6 octobre 1915. Lors de l'offensive allemande de Gorlice-Tarnów (actuelle Pologne), sur le front oriental, les Allemands tirèrent sur 15 km, 210 000 obus le 2 mai 1915, au moyen de 1 275 canons.

---

[647] Apollinaire, G. Calligrammes. *Poèmes de la paix et de la guerre (1913-1916).* Gallimard (2014). Lueur des tirs. Chant de l'horizon en Champagne, p. 105.

[648] Bibliothèque nationale de France. Rapporté par le Capitaine F. Culmann, *Choses d'Allemagne*, Paris, Lavauzelle, vers 1910, p. 114.

[649] De Gaulle, C. (1944). *Le Fil de l'Epée, op. cit*. p. 109.

[650] Ortholan, H. (2020). *L'artillerie de la Grande Guerre. 1914-1918, op. cit*. p. 9.

La bataille de Verdun est considérée comme l'exemple même de la bataille d'attrition où l'Artillerie s'illustra. Le 21 février 1916, à 7 heures 15, 1 200 canons allemands se tapissant à l'est des Hauts-de-Meuse, notamment en forêt de Spincourt, et dans la plaine de la Woëvre ouvrirent le feu sur les positions françaises. Le bombardement de préparation de l'offensive allemande, connu sous le terme de *Trommelfeuer*[651], totalisa un million d'obus durant cinq heures[652]. En moyenne, six obus tombèrent ce jour-là par mètre carré de champ de bataille. 60 millions d'obus furent tirés par les artilleries françaises et allemandes durant les 300 jours de la bataille. Lors du bombardement de préparation allié sur la Somme en juillet 1916, qui a duré sept jours, 1 732 873 obus furent tirés en continu sur les lignes allemandes par les seuls 50 000 artilleurs britanniques et 1 438 pièces[653].

L'année 1917 fut charnière. En 1917, tous les belligérants « *ont compris, ou fini par comprendre, que, pour obtenir un résultat décisif, l'artillerie ne pouvait être employée qu'en masse et faire aussi l'objet d'une préparation relativement brève pour bénéficier de l'effet de surprise*[654] ». Les Allemands, lors de leurs offensives du printemps 1918, tirèrent pas moins de 5 millions d'obus en cinq heures. En 1918, les offensives alliées sur les fronts occidental et alpin furent régulièrement appuyées par quelques 5 000 à 8 000 pièces d'artillerie. Durant la seule journée du 26 septembre 1918, furent consommés par l'artillerie française environ 1, 375 millions d'obus soit ¼ des stocks de 75 mm de 1914. Le Tableau 18 suivant montre clairement, en ce qui concerne l'artillerie française et pour des gammes de calibres de pièces de campagne et lourdes la progression d'un facteur 3 à 4 des tirs entre 1915 et 1917.

Offensives	75 mm	155 mm	220 mm
Champagne et Artois 1915	121 000	8 500	900
Verdun et Somme 1916	144 000	17 600	1 343
Aisne 1917	265 000	4 500	3 900
Offensive 1918	272 000	54 416	3 900

Tableau 18 : Consommation française journalière de munitions (pour trois calibres) lors de grandes offensives[655].

Le graphique de la Figure 111 illustre parfaitement l'intensité des tirs durant des épisodes de forte activité défensive ou offensive au front en 1917 et 1918. Le nombre de coups tirés journellement pour le seul canon français de 75 mm pouvait excéder les 800 000.

[651] Littéralement « le feu roulant »

[652] Ces quantités tirées peuvent être controversées au regard des cadences de tir des pièces d'artillerie lourde, de l'usure des tubes et des temps de refroidissement nécessaires.

[653] Audoin-Rouzeau, S. (2004). « Combattre. Artillerie et mitrailleuses », *op. cit*. p. 259.

[654] *Ibid,* p. 295.

[655] Tardieu, A. (1921). *La Paix*. Editions Perrin. p. 58.

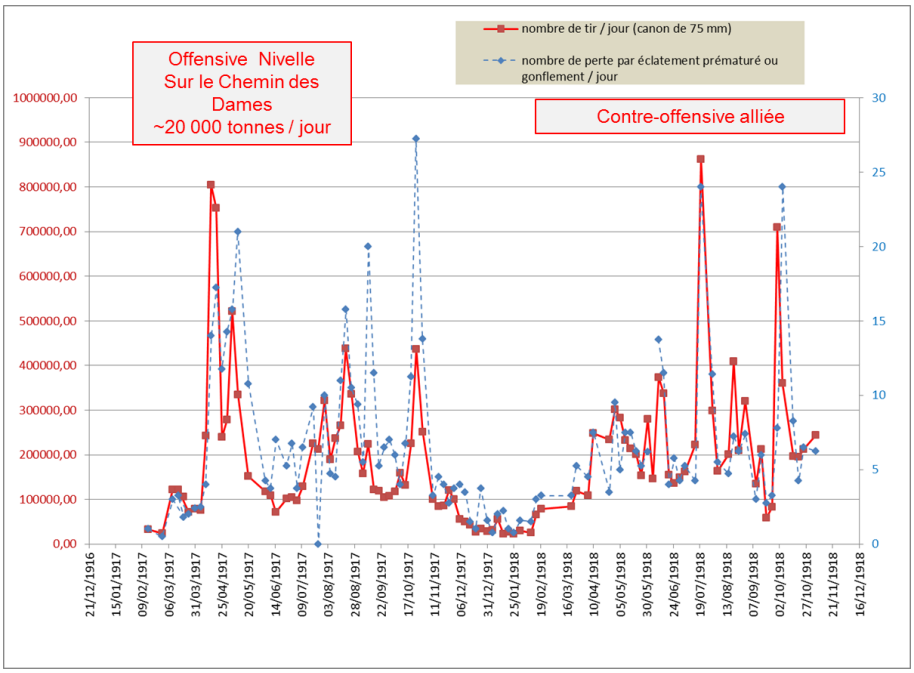


Figure 111 : Nombre de coups tirés par jour par le canon de campagne français de 75 mm entre décembre 1916 et l'armistice[656].

L'augmentation des calibres et de la puissance des pièces d'artillerie. L'affirmation de l'artillerie lourde

Au total, l'artillerie lourde vint à dominer les différentes formes de tirs sur le champ de bataille, tirs dont il existait une très grande variété en fonction des objectifs tactiques poursuivis[657].

Non seulement le nombre de tirs, de tubes ne cessèrent de croître sur le front occidental durant le conflit mais les calibres des projectiles augmentèrent aussi significativement.

Les parcs d'artillerie, notamment français et britanniques, étaient durant les deux premières années de la guerre largement dominés par les pièces de campagne, mobiles et hypotractées. L'Allemagne entra en guerre déjà forte d'une artillerie lourde de pointe, alors la plus puissante au monde. Le nombre de pièces d'artillerie lourde (d'un calibre supérieur à 105 mm) et la proportion de ces matériels dans les parcs d'artillerie ne cessèrent de croître jusqu'en 1917. Durant les deux premières années de la guerre « *le manque de pièces lourdes oblige à prélever des canons de l'artillerie côtière et de la Marine et des pièces obsolètes sorties des réserves des arsenaux*[658] ». Talon d'Achille de l'armée française en 1914, l'artillerie lourde rattrapa largement son retard sur les Allemands en 1917 sous l'impulsion de programmes ambitieux (décidés le 27 juillet 1915 et confirmé par celui du 30 mai 1916). Son allié britannique suivit la même trajectoire, bien que partant d'un handicap bien plus marqué en 1914 (avec seulement 2 000 pièces engagées). L'Allemagne poursuivit le développement de son artillerie dans la continuité. La proportion de pièces d'artillerie lourde dans le parc allemand passa de 38% en 1914 à 65% en 1918[659].

---

[656] Hubé, D. (2017), d'après Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28. Statistiques : graphiques des productions de matériels et munitions ; de la production et des importations de poudres, explosifs, produits chimiques de guerre, fontes et aciers ; de la consommation et des stocks de munitions ; des accidents de tir de 75 (registre d'Albert Thomas). 1914-1918.

[657] Audoin-Rouzeau, S. (2004). *Combattre. Artillerie et mitrailleuses*, *op. cit*. p. 258.

[658] Berlemont, J. (2016). « Matériels de l'artillerie ». In *Un milliard d'obus des millions d'hommes. L'artillerie en 14 / 18, op. cit*. p 59.

[659] Reibert, T (2013). *Die Entwicklung des Granatwerfers im Ersten Weltkrieg Die Entstehung eines neuartigen Waffentyps als Reaktion auf die Bedingungen des Stellungskrieges*, *op. cit*. p.150.

Il s'agit de la plus forte progression des pièces lourdes parmi les parties engagées sur le front occidental. Le nombre total de pièces d'artillerie lourdes de l'ensemble des parties belligérantes sur le front occidental en 1918 excèda 20 000 (cf. Figure 112). Le Tableau 19 ci-dessous montre très clairement l'accroissement significatif du nombre de tirs de l'artillerie lourde (au-dela du calibre 95 mm) comparativement à celui de l'artillerie de campagne (75 mm).

Offensives	75 mm	Du 95 au 155 mm	Du 220 au 270 mm	TOTAL
22-27 septembre 1915	1 387 370	265 483	30 317	1 683 170
22-10 juillet 1916	2 013 484	453 033	66 132	2 532 649
7-17 avril 1917	3 991 000	1 199 954	61 543	5 252 497

Tableau 19 : Nombre de tirs de l'artillerie française selon les gammes de calibre au cours de trois offensives entre 1915 et 1917[660].

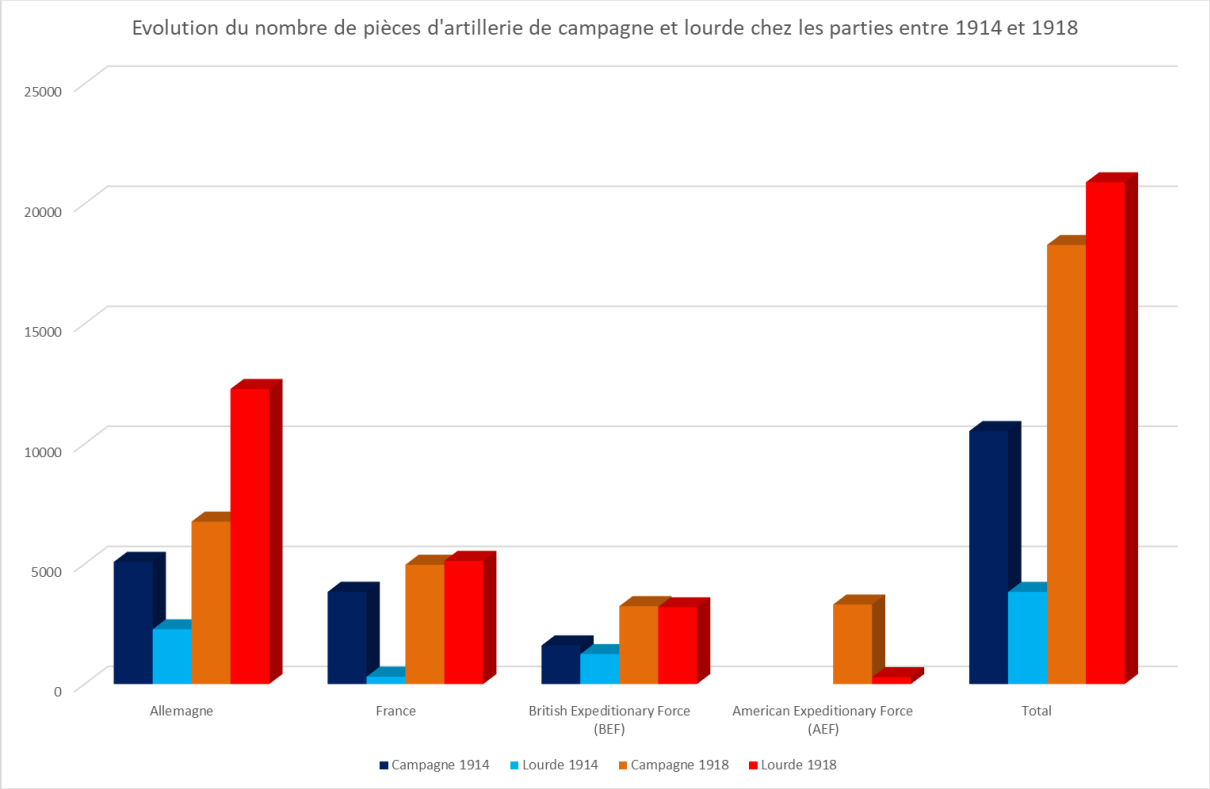


Figure 112 : Evolution du nombre de pièces d'artillerie de campagne et lourde entre 1914 et 1918 dans les parcs français, allemands et britanniques[661].

[660] Ortholan, H. (2020). *L'artillerie de la Grande Guerre. 1914 – 1918. Une arme en constante évolution*, *op. cit*. p. 296.

[661] Zabecki, T. D. (1994). *Steel Wind: Colonel Georg Bruchmüller and the Birth of Modern Artillery*, *op. cit*. p. 10-12.

4.6.2 Les statistiques industrielles de production de munitions, témoins de l'envolée des besoins de l'Artillerie

Les statistiques de la production industrielle d'engins de guerre apportent une autre indication quantitative concernant l'intensification de l'usage des moyens de l'Artillerie. Ces statistiques industrielles ne peuvent être mises directement en lien avec celles des engins tirés par les militaires, les munitions sortant d'usines n'ayant pas systématiquement été intégralement livrées aux armées mais échangées entre les parties de l'Entente et de l'Alliance, par des flux d'importations et d'exportations. Des incertitudes subsistent aussi concernant la nature des munitions visées par les chiffres (entre artillerie de campagne, lourde et d'infanterie).

Le GQG, soucieux de suivre l'évolution de la production industrielle de munitions des principaux calibres en dotation dans l'armée française, mais surtout celle des besoins en matières premières stratégiques pour ces fabrications (acier, fonte, explosifs nitrés, (per)chloratés, agents toxiques de guerre, etc.), établit des chroniques de production au pas de temps décadaire. Ces courbes[662] illustrent parfaitement l'envolée des demandes et besoins de l'artillerie française en campagne.

Le nombre de projectiles de 75 mm encartouchés culmina au moment de l'offensive Nivelle sur le Chemin des Dames en avril 1917 (cf. Figure 113), avec près de 250 000 unités, date à laquelle le GQG dénombra, pour le seul canon de 75 mm, le nombre considérable de 800 000 tirs par jour (cf. Figure 111). Pour le projectile de 105 mm, si en effet le nombre d'engins chargé marqua un pic au printemps 1917, celui-ci monta en flèche à compter d'avril 1918 (cf. Figure 114). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées à ce stade de la recherche pour expliquer cette tendance singulière comparativement aux autres calibres concernés par ces statistiques (60 mm, 75 mm, 90 mm, 120 mm, 150 / 155 mm) : (i) ce calibre constitua un bon compromis entre la puissance de feu de l'artillerie lourde, peu mobile, et l'artillerie de campagne, mobile, dans la guerre de mouvement qui caractérise l'année 1918, (ii) la pièce de 105 mm aurait largement doté l'armée américaine en grande partie équipée de moyens d'artillerie français. Selon Tardieu (1921), la production française totale de munitions d'artillerie durant la guerre s'élèverait à 300 millions de projectiles[663], marquée par une progression vertigineuse à trois ou quatre chiffres (cf. Tableau 20) et cela « *alors que l'invasion nous a privé en moyenne de 85% de nos ressources métallurgiques d'avant-guerre* [664]».

Période	75 mm	155 mm	220 mm
Troisième trimestre 1914	10 000	Néant	Néant
Troisième trimestre 1915	150 000	3 600	460
Dernier trimestre 1916	203 000	30 000	2 100
Juin 1917 à novembre 1918	233 000	39 000	3 400
Progression 1914 à novembre 1918	3 782%	983%	639%

Tableau 20 : Production journalière française des munitions de calibre 75, 155 et 220 mm au cours de la guerre[665].

[662] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28, *op. cit*.

[663] Tardieu, A. (1921) La Paix, *op. cit.* p. 58.

[664] *Ibid.* Tardieu fait ici référence à la perte d'une grande partie du bassin ferrifère de Lorraine à l'été 1914.

[665] *Ibid.*

Côté allemand, les travaux de recherche remarquables et pourtant non publiés de Bausinger (2011)[666], citant, compilant et discutant les chiffres de différents auteurs pour estimer les quantités produites pour et durant la Première Guerre mondiale et tirées (Ludendorff (1920)[667], Linnenkohl (1996)[668], Prentiss (1937)[669], *Bundesarchiv Miltär Freiburg*, Schön (1936)[670] et Weyrauch (1922)[671]) débouchent sur une estimation réaliste proche de 300 à 310 millions de projectiles produits, comprenant les engins d'artillerie de campagne, lourde et de tranchée. Selon Bausinger (2011), les quantités tirées par les Allemands auraient été de 250 à 300 millions d'unités. Ainsi, au regard de ces statistiques, entre 83 et 97% de la production industrielle allemande aurait été utilisée, sans qu'il soit ici possible de distinguer ce qui a été vectorisé sur les différents fronts sur lesquels fut engagée l'armée allemande. Ces recherches conduisent pour les Britanniques à environ 218 millions de munitions d'artillerie lourde et de campagne chargées et environ 35 millions d'engins de tranchée[672]. Le nombre de projectiles chargés culmina en 1917 chez les Britanniques avec 87,7 millions[673].

[666] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*, *op. cit*. p.10.

[667] Ludendorff, E. (1920). *Urkunden der Obersten Heeresleitung über ihre Tätigkeit 1916/18*.Berlin: Mittler, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit.*

[668] Linnenkohl, H. (1996). *Vom Einzelschuss zur Feuerwalze. Bonn: Bernard & Graefe*, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*.

[669] Prentiss, A. M. (1937). *Chemicals in war.* New York u. a.: McGraw-Hill, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*.

[670] Schön, E. (1936). *Geschichte des deutschen Feuerwerkswesens der Armee und Marine mit Einschluß des Zeugwesens.* Berlin: Paul, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*

[671] Weyrauch, R. (1922). *Waffen- und Munitionswesen. Die deutsche Kriegswirtschaft im Bereich der Heeresverwaltung 1914-1918*. Bd. 3. Berlin u. a.: de Gruyter, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*.

[672] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*, *op, cit*., p.17.

[673] War Office, 1922, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*.

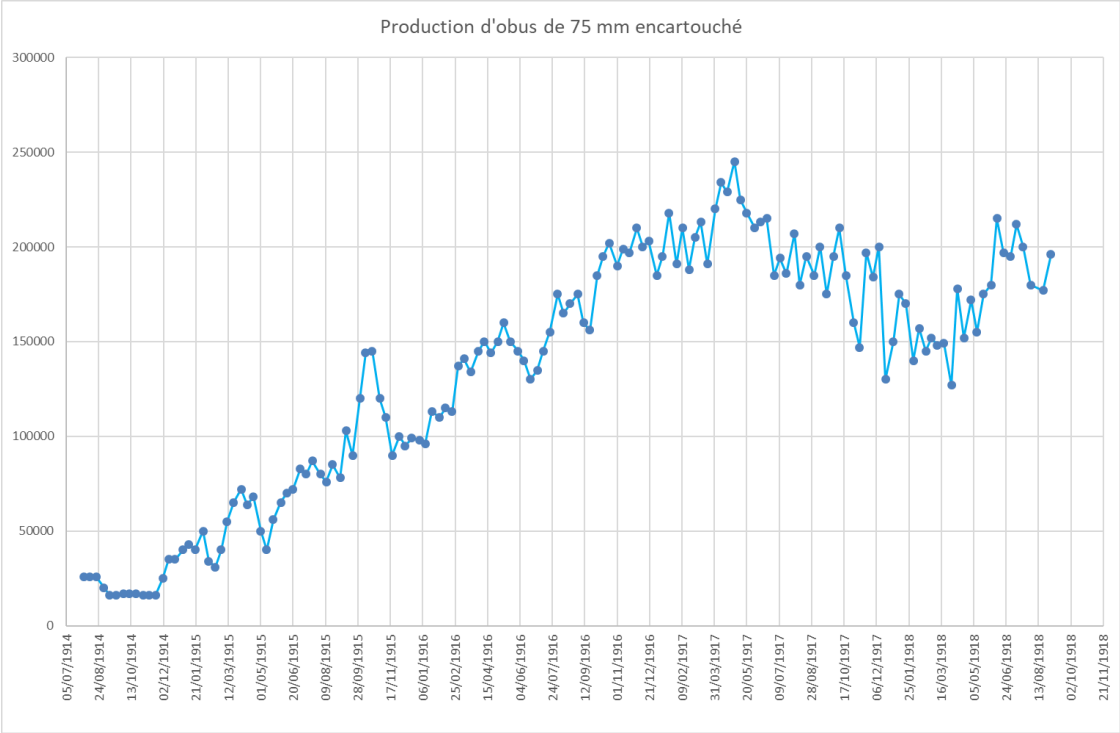


Figure 113 : Production française d'obus de 75 mm encartouchés durant la Première Guerre mondiale. Production décadaire[674].

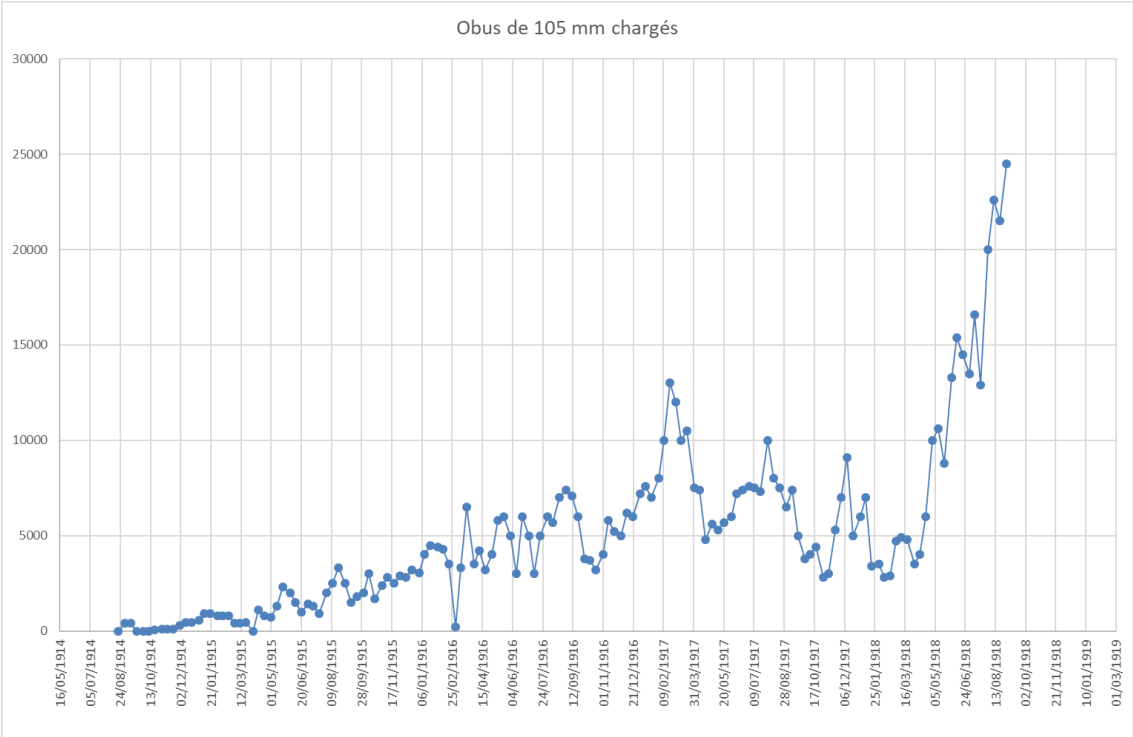


Figure 114 : Obus français de 105 mm chargé durant la Première Guerre mondiale. Production décadaire[675].

[674] D'après les données tirées des archives du Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28, *op. cit*.

[675] *Ibid.*

4.6.3 Propositions d'évaluation des quantités tirées

Nombre de tirs de l'artillerie de campagne et de l'artillerie lourde

Des chercheurs se penchèrent, en particulier dans l'entre-deux-guerres, sur les quantités de munitions et engins de guerre produits puis tirés durant la Première Guerre mondiale. Les différents travaux et sources ne débouchent pas sur une estimation faisant l'unanimité. Le Tableau 21 suivant est tiré des travaux de recherche de Bausinger (2011)[676]. Il rassemble, pour l'Allemagne et la France les différentes estimations pour les engins tirés par l'artillerie de campagne et l'artillerie lourde.

Source	Total (millions de tirs) (Allemagne)	Total (millions de tirs) (France)	Total
Fournier (1935)[677]	-	209	-
Linnenkohl (1996)[678]	272	191	463
Ludendorff (1920)[679]	285	-	-
Weyrauch (1922)[680]	298	-	-
Prentiss (1937)[681]	485	334	819
Schön (1936)[682]	291	-	-

Tableau 21 : Estimations des quantités de munitions d'artillerie lourde et de campagne tirées par la France et l'Allemagne durant la Première Guerre mondiale et le front occidental.

Les chiffres avancés par le général américain Prentiss en 1937[683] ne reposent sur aucune archive sourcée[684]. L'estimation de Linnenkohl[685] en 1996 n'est pas exhaustive car elle de considère pas, pour le cas de la France, certains des principaux calibres utilisés par l'artillerie française. Enfin, pour le cas de l'Allemagne, il n'est pas fait la distinction entre ce qui a été tiré sur le front occidental et les autres fronts (oriental, des Alpes, etc.). A noter que les quantités allemandes recensées sont aussi entachées d'incertitudes du fait du caractère incomplet des archives consultées par Bausinger (2011), car en effet 95% des archives militaires allemandes concernant la Première Guerre mondiale furent perdues lors du bombardement allié de Potsdam le 14 avril 1945 détruisant le *Reichsarchiv*[686].

---

[676] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*, *op. cit.*

[677] Fournier, H. (1935). « *Consommations de munitions pendant la guerre de 191914-1918 ». Revue d´Artillerie:* 97-116., cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*.

[678] Linnenkohl, H. (1996), *op. cit.*

[679] Ludendorff, E. (1920). *Urkunden der Obersten Heeresleitung über ihre Tätigkeit 1916/18*. Berlin: Mittler, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit*

[680] Weyrauch, R. (1922), *op. cit*.

[681] Prentiss, A. M. (1937), *op. cit*.

[682] Schön, E. (1936), *op. cit*.

[683] Prentiss, A. M. (1937), *op. cit*.

[684] Bausinger (2011) *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges, op. cit*, p.5.

[685] Linnenkohl, H. (1996), *op.cit*.

[686] Herrmann, M. (1994). *Das Reichsarchiv 1919-1945*. 2 Bde. Diss. Humboldt Uni Berlin, cité dans Bausinger, T. (2011), *op. cit.*

Les estimations, entachées d'incertitudes, donnent toutefois des ordres de grandeurs du nombre de tirs et mettent en exergue l'importance inédite des moyens d'artillerie déployés et utilisés durant la Première Guerre mondiale. Prentiss[687] estima ainsi en 1937 qu'environ 1,4 milliard obus auraient été tirés durant les quatre années de la guerre par les parties bélligérantes engagées sur le front occidental. Linnenkohl[688] en 1996 abaissa ce chiffre à 856 millions (cf. Tableau 22). Une quantité proche d'un milliard semble réaliste. Elle est en effet cohérente avec les quantités produites selon Bausinger (2011) pour l'Allemagne, la Grande-Bretagne et par Tardieu (1921) pour la France. Entre 80 et 95 % de cette production auraient été livrées aux armées et possiblement utilisées au front.

Sources	**Linnekohl (1996)**	**Prentiss (1937)**			
Type de munitions	Non spécifié	Conventionnelles	Chimiques	Total	% de munitions chimiques
Allemagne	272	485	33	518	6,4%
Grande-Bretagne	170	178	4	182	2,2%
France	(191)	334	16	350	4,6%
Etats-Unis	81	7	1	8	12,5%
Italie	-	146	4	150	2,7%
Autriche	70	170	5	175	2,9%
Russie	(72)	69	3	72	4,2%
Total	**856**	**1389**	**66**	**1455**	**4,5%**

Tableau 22 : Nature et quantités de munitions tirées par l'artillerie de campagne et l'artillerie lourde durant la Première Guerre mondiale (en bleu ciel, les bélligérants engagés militairement sur le front occidental)[689].

Le lieutenant Bert Van Huyse, du SEDEE (Service d'Enlèvement et de Destruction d'Engins Explosifs). à Poelkapellen, (Flandre occidentale, Belgique), estime que « *1 455 millions d'obus ont été tirés sur la ligne de front*[690] ». Il ajoute que « *4,5 % de ces obus sont toxiques, mais ce chiffre est sans doute plus élevé, car il se base sur les déclarations des Anglais [ndlr : antérieure à 1950] qui, jusque fin des années 1950, ont dit qu'ils n'avaient pas utilisé d'obus toxiques* ».

En multipliant le nombre de projectiles tirés pour chaque calibre par la masse des engins (selon Katthöfer, H. (1998)[691]), Bausinger (2011) obtient le tonnage de projectiles tirés. Pour l'Allemagne, si on considère les estimations de Ludendorff (1920) et de Weyrauch (1936), les tonnages tirés s'élèvent respectivement à 4,9 et 5,1 millions de tonnes[692].

[687] Prentiss, A. M. (1937), *op. cit*.

[688] Linnenkohl, H. (1996), *op. cit.*

[689]Bausinger (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*, *op. cit*. p.6. modifié.

[690] Masson – Loodts, I. « *Le lourd héritage des munitions de guerre* » http://www.paysagesenbataille.be/le-lourd-heritage-des-munitions-de-guerre/.

[691] Katthöfer, H. (1998). *Die deutsche Rohrwaffenmunition im 1. Weltkrieg*. Studie, cité dans Bausinger, T. (2011)., *op. cit.*

[692] Bausinger (2011) *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges, op. cit*. p.11.

Une estimation équivalente pour les artilleries françaises et alliées n'a pas été effectuée par Bausinger (2011), mais au regard des quantités tirées, au moins équivalentes chez les Français et leurs alliés, les tonnages seraient du même ordre de grandeurs que ceux des Allemands.

Au total, un ordre de grandeur de 10 millions de tonnes peut être avancé concernant le tonnage de munitions tirées majoritairement sur le front occidental. Les quantités de poudres et explosifs produites par toutes les parties belligérantes engagées sur le front occidental a été estimée à environ 3 millions de tonnes.

Un ratio entre le tonnage de projectiles tirés et celui des matières énergétiques les chargeant (et utilisées pour les vectoriser) de 30% apparaît réaliste au regard des données techniques disponibles sur les projectiles de tous calibres utilisés durant la Grande Guerre (le tonnage des cartouches et autres gargousses chargées d'ergols n'est pas connu et devrait se cumuler au tonnage des engins tirés rabaissant le ratio en dessous des 30%). Le ratio entre la masse de l'explosif et celle des projectiles d'artillerie de campagne allemands étaient entre 2 et 12%. Ce ratio s'élève entre 9 et 50% pour les projectiles d'artillerie de tranchée français aux parois fines et autorisant un chargement plus important en explosif. Le ratio devait être proche ou équivalent pour les *Minen* allemandes vues les similarités des matériels.

Données chiffrées concernant le nombre de projectiles d'artillerie de tranchée et grenades produits et/ou tirés

À cette estimation non exhaustive visant les projectiles de l'artillerie lourde et de campagne, il convient d'ajouter les projectiles lâchés d'avion, le tonnage considérable de munitions d'artillerie d'infanterie (cf. Tableau 23), engins dont le nombre réellement utilisé est difficile à estimer compte tenu de l'hétérogénéité de la nature des chiffres disponibles.

Les bornes chronologiques considérées diffèrent pour la France et l'Allemagne d'une part et la Grande-Bretagne et les USA d'autre part. Par ailleurs les munitions produites n'ont pas nécessairement été utilisées par son propre camp, mais par les Alliés à la faveur d'exportations et/ou de cessions de matériels.

Un chiffre (proche d'un milliard de tirs et jets) équivalent à celui des projectiles d'artillerie lourde et de campagne semble se dégager des travaux de recherche de Bausinger (2011).

Aucune statistique n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche concernant le tonnage de bombes d'aviation larguées durant le conflit.

Dénomination	Source	Partie	Nombre	Unité
Grenades à main / grenades projetées	Weyrauch (1922)[693].	Allemagne	145 000 000	Unités produites (1915-1917)
Obus de tranchée *Minenwerfer,* petit calibre			13 700 000	Nombre de tirs (1915-1917)
Obus de tranchée *Minenwerfer,* calibre moyen			2 700 000	
Obus de tranchée *Minenwerfer*, gros calibre			900 000	
Grenades à main	SHD, cote 4 N 96 Dos.1[694].	France	1 140 000	
Bombes de mortier de tranchée ("*Crapouillot*")			74 000	
Obus de mortier	Ministry of Munitions (1976): Vol. XI, part I[695].	Grande-Bretagne	16 371 000	Unités produites (1914-1918)
Bombes de tranchée Stokes fumigènes			~170 000	
Grenades à main conventionnelles *("Mills Bombs")*			46 600 000	
Grenades à main fumigènes			3 276 000	
Grenades à fusil			14 428 000	
Grenades à main et à fusil combinées			35 163 000	
Grenades	American Battle Monuments Commission (1938)[696].	Etats-Unis	2 700 000	Nombre de tirs (1914-1918)
Bombes & mines d'artillerie de tranchée			400 000	

Tableau 23 : Projectiles de tranchées produits et/ou tirés durant la Première Guerre mondiale[697].

[693] Weyrauch, R. (1922), *op. cit.*

[694] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 4 N 96, Dos.1, cité dans Bausinger, T. (2011).

[695] Ministry of Munitions (1976). History of the Ministry of Munitions. Vol. XI: The supply of munitions: Part I: Trench warfare supplies. Hassocks: Harvester, cité dans Bausinger, T. (2011).

[696] American Battle Monuments Commission (1938). *American armies and battlefields in Europe.* Washington: Government Printing Office, cité dans Bausinger, T. (2011).

[697] Bausinger (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*, *op. cit.* p.16.

Données chiffrées concernant le nombre de munitions pour armes portatives produites et/ou tirées

L'Armée allemande utilisa près de 5, 735 milliards de munitions d'armes portatives (SAA, *Small Arms Ammunition*)[698]. Côté français un total de 7,6 milliards de munitions de ce type auraient été utilisées. Par ailleurs environ 12 milliards de cartouches pour signaux lumineux et 74 millions de grenades à main auraient été livrées aux armées françaises[699]. La Grande-Bretagne produisit 9,1 milliards de munitions d'armes portatives et en importa des Etats-Unis 0,9 milliards. Parmi ces 10 milliards d'unités, 2,8 milliards furent cédés aux Alliés et en particulier à la Russie[700]. Le nombre total de projectiles d'armes portatives utilisés s'établirait donc aux alentours du nombre vertigineux de 20 milliards.

4.7. UN BREF BILAN HUMAIN ET MATERIEL

La Première Guerre mondiale fut, de par l'ampleur de l'usage de moyens de l'Artillerie et d'armes innovantes puissantes, un conflit jusqu'alors inédit. Lorsque les hostilités prirent fin en novembre 1918 sur le front occidental, la guerre avait légué au temps de paix, aux sinistrés, aux autorités civiles comme militaires, une situation elle aussi inédite par l'ampleur des destructions. Jamais encore auparavant dans les guerres du XIXe siècle les destructions occasionnées par les combats ne furent d'une telle ampleur à l'échelle d'un si vaste territoire, celui de l'ancien front occidental.

L'Artillerie provoqua aussi 70% des pertes et blessures de la Première Guerre mondiale sur le front occidental, bouleversa les sols du nord et de l'est de la France (parmi les plus fertiles du pays) et de Belgique sur plusieurs mètres de profondeur[701], transforma définitivement des paysages et raya des cartes, à l'instar de Messines (cf. Figure 115) en quelques mois des villages entiers, comme l'auraient fait 40 000 à 80 000 d'érosion naturelle. L'écrivain combattant Roland Dorgelès dans son roman *Le Réveil des Morts* décrit d'abord ces paysages post-apocalyptiques en ces termes « *Vous venez dans les pays aplatis, lui avait dit un employé à la gare de Soissons. C'est bien cela : aplatis. Le village, la contrée n'avaient plus de hauteur, le pilon de la guerre avait tout enfoncé dans le sol* [702]» puis les ruines du bourg de Crécy dans l'Aisne en ces termes « *Quatre années de guerre avait passé sur lui comme* des *siècles d'abandon*[703] ». 620 villages furent entièrement détruits en France et des territoires entiers furent ruinés (trois millions d'hectares impactés). Certains d'entre eux ne furent pas reconstruits (Ormes, Nauroy, etc.) ou reconstruits à un emplacement différent de celui originel (Vauquois en Meuse, Cerny-en-Laonnois, Craonne dans l'Aisne, Perthes-les-Hurlus, aujourd'hui rattaché à la commune de Souain-Perthes-les-Hurlus, Ripont, rattaché à la commune de Rouvroy-Ripont dans la Marne, etc.). Des villes comme Reims, Soissons, Lens et Arras furent détruites à hauteur de 80 - 90 %.

---

[698] Bausinger (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges, op. cit.* p.11.

[699] Reboul (1925). *Mobilisation industrielle. Tome I: Des fabrications de guerre en France de 1914 à 1918*. Nancy u. a.: Berger-Levrault, cité dans Bausinger, T. (2011). p. 16.

[700] Ministry of Munitions (1976). *History of the Ministry of Munitions. Vol. X: The supply of munitions: Part III: Gun ammunition: Shell manufacture.* Hassocks: Harvester et Ministry of Munitions (1976) History of the Ministry of Munitions. Vol. XI: The supply of munitions: Part VI: Small arms ammunition. Hassocks: Harvester, cité dans Bausinger, T. (2011). p.17.

[701] Hupy, J., Schaetzl, R. (2008), *op. cit*.

[702] Dorgelès, R. (1923). *Le Réveil des Morts*, *op. cit*. p. 13.

[703] *Ibid,* p.21.

Des dix départements français martyrisés, le plus dévasté fut incontestablement l'Aisne. Sur le plan militaire, le département fut le théâtre des opérations de près d'une dizaine de grandes batailles, échelonnées des premiers aux derniers instants de la Grande Guerre. Les combats concernèrent aussi l'intégralité de son territoire. Par ailleurs, le département a connu des dévastations infligées aux habitations, aux usines, aux cultures par la tactique allemande de la terre brûlée, implacablement et méthodiquement mise en œuvre durant le repli stratégique sur la ligne Hindenburg de mars 1917. Sur 841 communes, 725 furent touchées dont 334 totalement détruites[704]. En décembre 1918, il ne restait que 300 habitants à Soissons pour 14 000 avant-guerre.

Figure 115 : Effacement sous les obus du village de Messines, Flandre occidentale, Belgique[705].

1 827 187 soldats allemands, 743 702 combattants britanniques, 115 705 Américains tombèrent sur les sols français et belges. 1 350 000 Poilus perdirent la vie, soit 10 % de la population active française. Au total, on dénombra 9,5 millions de morts, 650 000 veuves et un million d'orphelins. Sur le plan humain et démographique, le continent fut saigné par tous ces morts, auxquels il faut ajouter les millions pertes liées à la grippe dite espagnole, entre 30 et 50 pour l'ensemble de la planète, 20,5 millions de blessés, des quantités impressionnantes de malades, d'infirmes, d'invalides, les mutilés, « Gueules cassées », des âmes anéanties aux corps tremblants, souffrant d'*obusite* (prostration ou enfermement sur soi, ou PTSD pour *Post Traumatic Syndrome Deseases*).

Par la loi du 17 avril 1919, l'État se rendit acquéreur des territoires jugés irrécupérables qu'il délimita au crayon rouge sur une carte. Cette loi attribua un statut particulier aux terres sur lesquelles se déroulèrent les combats les plus âpres. Les terrains furent classés en trois catégories puis quatre : les zones rouge, jaune, bleue, puis l'étrange zone rose. La *zone rouge* naquit de la conviction des observateurs et de l'opinion que la restauration et la remise en état des sols dévastés était impossibles sur les zones les plus durement impactées, notamment sur le secteur des grandes batailles de la période 1915-1917. Il s'agissait des terres dont la remise en état avait été jugée par l'État trop coûteuse par rapport à la valeur vénale du terrain avant-guerre. La *zone rouge* formait un chapelet discontinu, tantôt large, tantôt étroit dont le tracé resta longtemps confus et imprécis. Administrativement, ces terres restèrent gelées jusqu'en 1920. Certaines zones de dévastation, montrant de fortes densités d'engins de guerre, ne furent rendues accessibles qu'après 1920 dès que des décrets permirent de réduire la surface de la *zone rouge* et rendre un maximum de superficie de terres à nouveau cultivables. Dans le nord de la France, cette zone se réduisit très rapidement à peau de chagrin (sous l'effet de lobby agricoles pour récupérer ces terres des grandes plaines agraires parmi les plus fertiles de France).

---

[704] Bibliothèque nationale de France. Véziat., E. (2001). *La reconstruction dans le département de l'Aisne après la Grande Guerre. Société Historique de Haute-Picardie. Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie de l'Aisne. Mémoires*. p. 129.

[705] Imperial War Museum, number Q 12212.

Ces terres rachetées par l'État subsistent de nos jours avec les grands camps militaires de la Picardie (Sissonne), de Champagne (Moronvilliers, Suippes), la forêt domaniale de Verdun (zone reboisée par des pins noirs d'Autriche au titre du dédommagement de guerre) (zones reboisées attribuées à l'administration des Eaux & Forêts) ou encore certaines enclaves mémorielles (Vimy, Beaumont-Hamel…) (gérées après-guerre par l'administration des Beaux-Arts).

5. Résumé et conclusions de la Section 3h

> *« The war of 191914-1918 was an artillery war. Artillery was the battle winner, artillery was what caused the greatest loss of life, the most dreadful wounds and the deepest fear[706] »*

Rien n'avait réellement changé pour l'Artillerie depuis le XVe siècle jusqu'à la première moitié du XIXe siècle. Cette arme fit, sous l'effet des progrès des sciences et techniques sa révolution durant la seconde moitié du XIXe. Elle s'opéra par des sauts technologiques stimulés par d'importantes avancées dans les domaines de la chimie de synthèse (pour les poudres et explosifs) et de la métallurgie (pour les canons et leurs projectiles), qui firent l'essence même (avec l'usage de l'électricité et du pétrole) de la Seconde Révolution industrielle. Les boulets pleins et les obus rudimentaires en fonte, chargés de poudre noire, furent délaissés au profit de projectiles oblongs et profilés (« obus torpille ») en acier chargé de nouveaux explosifs brisants puissants et propulsés par des poudres nitrocellulosiques sans fumée dont la puissance allongea les portées, tout en garantissant la discrétion du tir et la reproductibilité de la trajectoire. Les cadences de tirs s'accrurent aussi avec le chargement des canons par la culasse et leur précision très nettement améliorée par les rayures hélicoïdales internes des tubes des pièces d'artillerie.

L'artillerie allemande sut tirer profit de ces avancées technologiques et modernisa, sous l'impulsion de grands industriels (mais aussi par les nécessités des circonstances, des conflits contre le Danemark, l'Autriche dans lesquels elle était engagée), son parc d'artillerie, puis fit lors de la guerre franco-prussienne de 1870 l'éclatante démonstration de sa supériorité sur celui, obsolescent des Français. Jamais encore auparavant, des armes n'avaient atteint un tel potentiel d'attrition et de destruction. Les premiers traités internationaux censés « réguler » la guerre furent alors signés en réponse à la prolifération de ces armes et à la montée des tensions et rivalités entre grandes puissances qui annoncèrent la Première Guerre mondiale.

Débutée à l'été 1914, à cheval et à pieds, la Première Guerre mondiale s'acheva 52 mois plus tard avec des chars et des avions. Les exigences de la guerre acculèrent la science au front raccourcissant les durées entre les planches de dessin des ingénieurs aux lignes de production, forçant aussi ces ingénieurs à se poser des questions auxquelles ils n'auraient jamais imaginé. La mutation de l'Artillerie ne fit pas que se poursuivre durant la Première Guerre mondiale mais s'accéléra pour répondre aux besoins des armées, imposés par la physionomie de la guerre. Les moyens et projectiles de l'Artillerie s'adaptèrent aux conditions de la guerre de mouvement comme à celle de siège, les matériels se diversifièrent et se spécialisèrent, tandis que le nombre de pièces d'artillerie augmenta. L'Artillerie et la balistique s'affirmèrent en 1914-1918 comme une arme et une discipline hautement techniques. La Première Guerre mondiale ne fut pas d'emblée la Grande Guerre de l'Artillerie mais le devint, laissant dans nos représentations l'image de l'obus comme un symbole fort de la Première Guerre mondiale.

[706] John Terraine (1982). *White Heat: The New Warfare 191914-1918*, p. 95.

En 1914, durant la phase de guerre de mouvement, orchestrée par l'Infanterie, l'Artillerie était considérée dans la doctrine militaire française comme une arme secondaire par rapport à l'Infanterie et la Cavalerie qu'elle devait soutenir. Elle devait être utilisée avec parcimonie car potentiellement gênante pour les manœuvres rapides. Confiantes dans leurs plans offensifs respectifs, aucune partie n'avait imaginé une guerre inscrite dans la durée. Aucun stock de munitions, poudres et explosifs n'avait été constitué au moment où, en septembre 1914, les plans offensifs allemand et français, misant sur une issue victorieuse en quelques semaines, échouèrent.

Les Français furent contraints à la retraite en direction de la Marne après leur déconvenue sanglante de la bataille des frontières, puis les plans Allemands furent à leur tour déjoués à l'issue de la contre-offensive française de la première bataille de la Marne. Mais à la Guerre, il est essentiel d'avancer, mais il est primordial de ne pas reculer. Le conflit prit une tournure inattendue avec l'arrêt de la guerre de mouvement, l'absence de plan B, puis fin 1914, après la « course à la mer » avec la cristallisation du front occidental qui se figea dans une posture statique par le renoncement à l'offensive et la recherche du salut par la défensive. Dès septembre 1914, la consommation de munitions dépassaient déjà toutes les prévisions, avec en corollaire, la menace d'avoir à arrêter prématurément la guerre faute de projectiles.

Cette « crise des munitions » força l'Etat-Major français à rechercher dans un premier temps des parades militaires, puis les gouvernements (en France comme en Allemagne) à rechercher puis mettre en place en urgence des solutions industrielles pour satisfaire au plus vite les besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne. Des usines métallurgiques et chimiques existantes furent adaptées et/ou agrandies, d'autres sortirent de terre. L'hubris destructive de l'Artillerie durant la Grande Guerre ne fut rendue possible que par une totale mobilisation vers l'effort de guerre des capacités de production des industries sidérurgiques (pour la fonte, l'acier et les métaux et alliages non ferreux comme le laiton), métallurgiques (pour transformer des barres d'acier en obus oblongs) et surtout chimiques, celle des poudres (propulsives) et explosifs. A défaut ou en renfort il fut fait appel aux importations. Quatre emprunts nationaux furent nécessaires pour soutenir cet effort de guerre. L'Allemagne organisa aussi son industrie, mais plus rapidement que son pendant français du fait de ses spécificités structurelles.

L'Artillerie s'imposa avec le durcissement des positions défensives comme une arme décisive, seule capable, par son pouvoir de destruction et d'attrition à distance, d'ouvrir des brèches dans les retranchements ennemis et de rompre le front. Une arme devenue « *gagneuse de bataille*[707] ». Dès fin 1914, les protagonistes cherchèrent à compenser localement, sur des points clés et prisés du front, leurs carences d'artillerie lourde par les attaques souterraines de la guerre de mines, une tactique obsidionale ancienne qui visait à venir placer le plus discrètement possible de fortes charges sous les fortifications adverses pour détruire des points durs et ouvrir des brèches dans lesquelles pouvait s'engouffrer les fantassins. L'année 1915 fut celle des tentatives de reprendre la guerre de mouvement et de desserrer l'étau d'un front figé au point mort depuis l'hiver 1914-1915. Les Français misèrent pour une percée décisive sur une stratégie d'usure et de rupture combinant des opérations d'intérêt local et les grandes offensives du printemps et de l'automne. L'offensive de la première bataille de Champagne inaugura en février 1915 la tactique interarmes du bombardement massif de la préparation d'artillerie. L'année 1916, n'apporta aucune innovation tactique majeure dans la guerre ; elle fut marquée par l'exacerbation des engagements militaires et des moyens alloués. 1916 fut, avec la bataille de Verdun puis de la Somme, l'année de l'invention et de l'affirmation des « hyperbatailles[708] ». En 1917, la tactique de la guerre de mines souterraine utilisée depuis 1914 pour pallier aux carences de puissance de feu de l'artillerie lourde, devint vaine, la puissance de feu de l'Artillerie rendant caduque toute perspective d'offensive et de percée sur un vaste front. Les canons tenaient le front.

---

[707] John Terraine (1982). *White Heat*, *op. cit.*

[708] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle*, *op. cit.*

La durée de la guerre permit à la France dès 1917 de rattraper son retard sur l'Allemagne concernant son équipement d'artillerie, et à toutes les parties de développer des armes vers toujours plus de pouvoir d'attrition et de destruction.

Durant la Première Guerre mondiale, le nombre de pièces d'artillerie, la puissance de feu, la densité, les cadences et précisions des tirs ne cessèrent de croître. La précision des tirs fut aussi améliorée par des progrès de la balistique. L'Artillerie se diversifia aussi, se spécialisa tant dans son matériel que dans les tactiques suivies, pour répondre aux besoins opérationnels évolutifs des armées en campagne.

Aux artilleries lourdes et de campagne vinrent se rajouter l'artillerie de tranchée, l'artillerie spéciale (chars et blindés), l'artillerie antichar, antiaérienne. Les chargements des projectiles évoluèrent aussi en réponse à la spécialisation de l'arme : aux obus explosifs et à balles de 1914 s'associèrent ceux à chargements chimiques, incendiaires, éclairants, fumigènes. Les années 1917 et 1918 furent celles de l'artillerie chimique, dont les projectiles étaient chargés d'agents toxiques de plus en plus agressifs, sournois et efficaces par l'optimisation de leur dispersion. Les matériels de l'Artillerie et leurs armes, les obus, utilisés en 1918 ou entreposés dans les dépôts au moment de la cessation des hostilités, étaient fondamentalement différents de ceux de 1914, tant dans leurs diversités de calibre et de chargements, avec une part importante de projectiles lourds et d'engins à chargements chimiques, que dans la composition même des engins et de leur chargement.

Les portées furent aussi allongées jusqu'à autoriser des frappes à plus de 70 km sur les arrières, sur des objectifs militaires mais aussi civils, tandis que l'aviation de combat émergente se dota d'appareils de plus en plus robustes, fiables, maniables, avec des rayons d'action autorisant les bombardements stratégiques sur des objectifs éloignés. Des séquences de tir spécifiques furent imaginées et mises en œuvre pour (i) préparer les assauts, d'autres (ii) pour accompagner la progression de ses fantassins ou (iii) pour chercher à interdire celle de l'adversaire (tirs de barrage), (iiii) pour à anéantir les bouches à feu ennemies (tirs de contre-batterie) ou encore (iiiii) pour frapper « en profondeur » des cibles militaires ou civiles à l'arrière. La planification des offensives misait sur la combinaison interarmes, vertueuse, de l'Artillerie et de l'Infanterie.

Cette Artillerie déployée pour les besoins de la guerre de siège s'avéra inadaptée, trop lourde et peu maniable, avec la reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918, les Alliés lui préférèrent l'artillerie « spéciale », motorisée, apparue sur les champs de bataille en 1916, sans résultats convaincants, et ensuite nettement améliorée : le char, capable en tout terrain d'accompagner avec sa puissance de feu l'infanterie dans ses poussées. La guerre se mécanisa et le moteur devint roi. Cette évolution technologique et militaire posa le socle du couplage chars / avions préfigurant les tactiques militaires de la Seconde Guerre mondiale.

La Première Guerre mondiale constitua un point de rupture avec une conception de la guerre dont la conclusion reposait sur la bataille, un choc frontal et brutal, conclusif et décisif, dans un laps de temps très resserré, de troupes opposées. Les batailles s'inscrivirent dès lors dans la durée, sans être décisives, quelques mois à presque un an pour celle de Verdun. Le recours systématique et massif aux moyens de l'artillerie sur des champs de bataille et sur de longues périodes de temps contribuèrent à générer (i) de très fortes densités d'impacts et donc (ii) des niveaux de destruction encore jamais vus. L'Artillerie fit alors d'une guerre, évènement court, d'une extrême violence, pour la première fois, un facteur de modification anthropique de l'environnement par le bouleversement profond, durable et irréversible des sols et des paysages. L'empreinte de la guerre sur la structure et la physionomie des sols fut une conséquence de l'usage massif d'armes nouvelles, puissantes, de la durée de la guerre, du caractère quasi-statique d'une ligne de front occidentale s'étendant sur 750 km et de la diversité des compartiments environnementaux sollicités et/ou investis pour la première fois par ou pour les combats.

Les quantités tirées par les artilleries lourdes, de campagne et de tranchée, les tirs et jets de grenades, furent inouïes et inédites, excédant possiblement les deux milliards d'unités et les 10 milliards de tonnes. L'intensité des bombardements fut inégale selon les secteurs du front et sur la durée de la guerre.

La Grande Guerre fut aussi le premier choc anthropologique du XXe, une inflexion dans les représentations positivistes du progrès, une mise à mal de cette croyance aveugle que sciences et techniques étaient entièrement vouées au bien-être de l'Humanité. Dans cette guerre des machines et de matériel (*Materialschlacht*), le soldat devint l'ouvrier de la destruction, usant d'actes guerriers désincarnés car pour la première fois aussi, il donna la mort sans voir celui visé. L'Artillerie infligea 70% des pertes et raya en quelques semaines des villages entiers des cartes, bouleversa irrémédiablement les topographies.

Section 4h.
Devenir des munitions tirées et des charges de destruction

1. Introduction de la Section 4h

La production industrielle massive, aux cadences effrénées, de matières et matériels explosibles et l'usage de munitions en tout genre à grande échelle durant la Première Guerre mondiale, dans des proportions et échelles alors totalement inédites, entrainèrent en cascade des phénomènes inusités dans le temps de guerre, eux aussi à des échelles et magnitudes encore jamais rencontrées, et susceptibles d'avoir des répercussions environnementales avec en premier lieux les destructions et les transformations paysagères, conséquences de l'intensité des bombardements par des projectiles d'une grande puissance. Mais ces tirs se traduisirent aussi par d'autres conséquences inhérentes aux différents régimes de fonctionnement et de dysfonctionnement des engins de guerre suivis au terme des tirs. Les modalités d'introduction dans les sols, la mise en contact avec l'environnement des éléments et composés constituant (i) les matières explosibles et agressives, (ii) les munitions de la Grande Guerre et leurs chargements, utilisés par millions de tonnes sur le front occidental entre 1914 et 1918 (explorés, identifiés et décrits dans la Section 1h, quantifiés dans les Sections 3h et 4h), sont d'abord étroitement dépendantes du devenir des projectiles une fois tirés. Des charges de destruction (fourneaux) souterraines se montrèrent aussi dysfonctionnelles. La présente Section 4h décrit ces différents régimes et propose des éléments historiques permettant d'en identifier les causes

2. Les trois régimes de fonctionnement et dysfonctionnement des engins tirés

Les munitions tirées suivirent trois régimes illustrés par la Figure 116 ci-dessous.

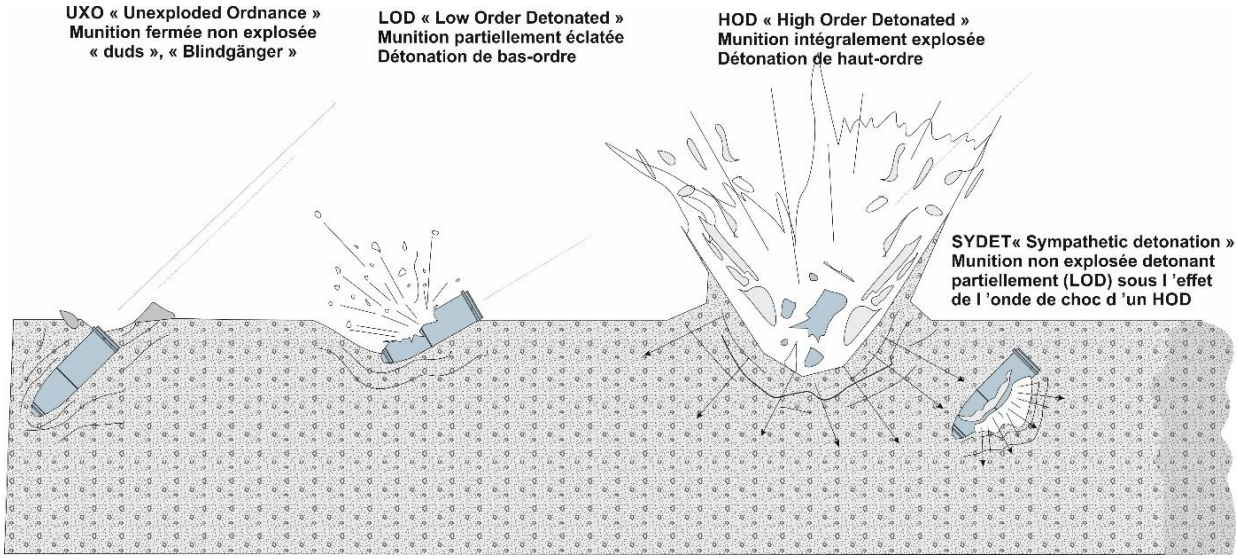


Figure 116 : Régimes de fonctionnement des munitions tirées[709].

[709] D'après Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit*.

La détonation complète (dite « de haut-ordre » ou *High-Order Detonation* (acronyme HOD chez les anglo-saxons)) des munitions tirées sur leurs cibles était l'effet recherché par les artilleurs. Elle se traduisit par un déchirement complet de l'enveloppe métallique des projectiles, lacérée en multiples éclats coupants de toutes tailles se propageant à la vitesse de la détonation, la décomposition quasi complète du chargement explosif produisant une onde thermique et de choc suivie d'un souffle par le déplacement subit de l'air. Les munitions explosèrent alors sur (coup au but) ou au plus près de la cible à l'impact, après impact (en s'enfonçant dans le sol ou les bétons), ou au-dessus du champ de bataille (dans le cas des obus à balles ou à mitraille), sur ou au terme d'une trajectoire balistique prédéfinie. On parle d'explosion « par sympathie » lorsque la détonation HOD d'un engin (non explosé présent dans ou sur les sols) est provoquée par l'onde de choc d'un autre.

Durant la Grande Guerre, ainsi que durant les conflits modernes et contemporains mobilisant des moyens de l'Artillerie, une fraction des engins tirés ne fonctionna pas comme escompté se traduisant au mieux par des incidents de tir au pire par des accidents de tir. Les régimes dysfonctionnels à l'impact (correspondant aux incidents de tir) étaient de deux types (i) la détonation partielle (régime de déflagration) ou détonation de bas-ordre (ou *Low-Order Detonation* (acronyme LOD chez les anglo-saxons)) durant laquelle une partie du chargement resta inerte, (ii) l'absence totale de détonation. Ces typologies de dysfonctionnements des munitions, ainsi que leurs conséquences, sont décrites dans ce qui suit.

3. Fonctionnement dégradé des munitions tirées. Phénomènes, origines et conséquences.

3.1. LES ACCIDENTS DE TIR. DETONATIONS PREMATUREES CATASTROPHIQUES

Les artilleurs furent confrontés durant la guerre à de nombreux accidents de tir correspondant à des dysfonctionnements catastrophiques des projectiles survenant à différentes étapes d'un tir. Les projectiles pouvaient exploser prématurément soit dans l'âme du canon, ou au sortir de la bouche-à-feux soit durant le vol. Le premier cas de figure se traduisait parfois par un gonflement des tubes des canons jusqu'à leur éclatement violent avec des conséquences préjudiciables, radicales, pour la pièce comme pour ses servants, l'ensemble étant mis hors de combat. Ces obus fabriqués en flux tendus, à la va-vite explosaient ainsi en 1914 à raison d'un accident pour 3 000 coups tirés contre 500 000 avant-guerre.

Les raisons de ces accidents étaient clairement multifactorielles. En cause, notamment (i) les obus à ogives vissées, parfois mal serrées, et dont la poudre s'enflammait au contact de l'âme brûlante du canon, (ii) les matières premières constitutives des projectiles pouvaient être hétérogènes, de provenances diverses et de qualité variable[710], conséquences des rythmes de production à l'usine qui s'emballaient, en privilégiant les quantités au détriment de la qualité « *avec élargissement des tolérances et des conditions de recettes et la diminution des contrôles*[711] ». D'autres facteurs peuvent être invoqués comme (i) la mise en service rapide et en quantité de nouveaux types de munitions, (ii) sur le champ de bataille, certains artilleurs, pour rendre les fusées plus sensibles, n'hésitaient pas à effacer les sécurités. La main d'œuvre ouvrière spécialisée et expérimentée des usines de matériels et matières explosibles fut aussi envoyée au début de la guerre au front se battre aux sein d'unités combattantes, remplacée à l'usine par une main d'œuvre bien moins qualifiée, délivrant un travail de moindre qualité.

[710] Des tassements, des soufflures et une cristallisation hétérogène de l'explosifs dans le chargement étaient par exemple observés.

[711] *Un milliard d'obus, des millions d'hommes. L'artillerie en 14/18*, *op. cit*. p.101.

Au 31 décembre 1915, les Français avaient perdu 1 046 canons par éclatement accidentel, sans parler des 1 514 autres défectueux à force d'avoir tiré et de s'être précocement et anormalement usés. Des mesures drastiques de contrôle de la qualité de la production furent alors adoptées. Des améliorations furent aussi apportées aux parties à risque des obus. Le 4 mai 1915, Clemenceau avait déjà prévenu ses proches que si le Gouvernement ne mettait pas fin aux malfaçons dans la confection des obus « *malfaçons qui nous ont coûté plus de canons que les Allemands nous en ont pris*[712] », il porterait la question à la tribune du Sénat. Les accidents de tir ne furent pas supprimés par ces mesures mais leurs fréquences furent drastiquement diminuées. La survenue de ces accidents fut proportionnelle au nombre de tirs par jour pour le canon de 75 mm (cf. Figure 111), oscillant globalement en 1917 et 1918 entre 3 et 25 accidents / jour pour ce calibre et l'artillerie française.

3.2. LES INCIDENTS DE TIR DE L'ARTILLERIE. DETONATIONS PARTIELLES OU INEXISTANTES DES PROJECTILES

> « *Pendant le bombardement, un 210 ayant traversé les couches de rondins a roulé au milieu du grand abri où se trouvait la liaison du bataillon, sans éclater ni écraser personne. Mais il y eu trois secondes terribles, en présence du monstre qui allait peut-être s'ouvrir et broyer les hommes pétrifiés*[713] ».

Des incidents de tir se produisirent aussi. Ces dysfonctionnements des projectiles, sans incidence pour les pièces d'artillerie qui les tirèrent, étaient de deux types. Soit la munition n'explosait pas à l'impact et restait intègre, soit elle n'explosait que partiellement en suivant un régime de déflagration, de détonation de bas-ordre.

3.2.1 Les projectiles non explosés. UXO (*UneXploded Ordnances*)

Les « ratés » au point de chute (encore dénommés *duds* ou UXO (pour *UneXploded Ordnance* chez les anglo-saxons ou *Blindgänger* chez les Allemands) étaient principalement la conséquence des dysfonctionnements des systèmes de déclenchement de l'explosion (fusées avec leurs détonateurs). Les causes du non fonctionnement des fusées-détonateurs étaient environnementales et/ou techniques. Dans les sols trop meubles, comme ceux argileux et gorgés d'eau (marécageux ou « brassés » par les multiples détonations), le refoulement du dispositif percutant pouvait être incomplet à l'impact. Ce cas de figure était fréquent en Flandre occidentale (Belgique) où la combinaison de terrains argileux et d'une pluviométrie exceptionnelle transforma les champs de bataille en océan de boue. Les géologues allemands cartographièrent ces terrains argileux au regard de leur capacité à atténuer la propagation des éclats (*Splitterwirkung*) et à absorber les UXOs[714].

Un angle d'incidence de la trajectoire du projectile trop faible sur sa cible était aussi favorable à l'absence totale de détonation. Les fusées pouvaient aussi présenter des défauts et avaries, dès la sortie de l'usine ou encore être dégradées par les mauvaises conditions de stockage à l'air libre, en présence d'humidité, dans les dépôts au plus près du front.

---

[712] Archives de la Préfecture de Police de Paris, cote B/A 1535. Note du 4 mai 1915.

[713] Chevallier, G. (1930). « La Peur. En Champagne ». In *1914 – 1918. Français et Allemands dans les tranchées.* Librairie Générale Française. 2013. p. 985.

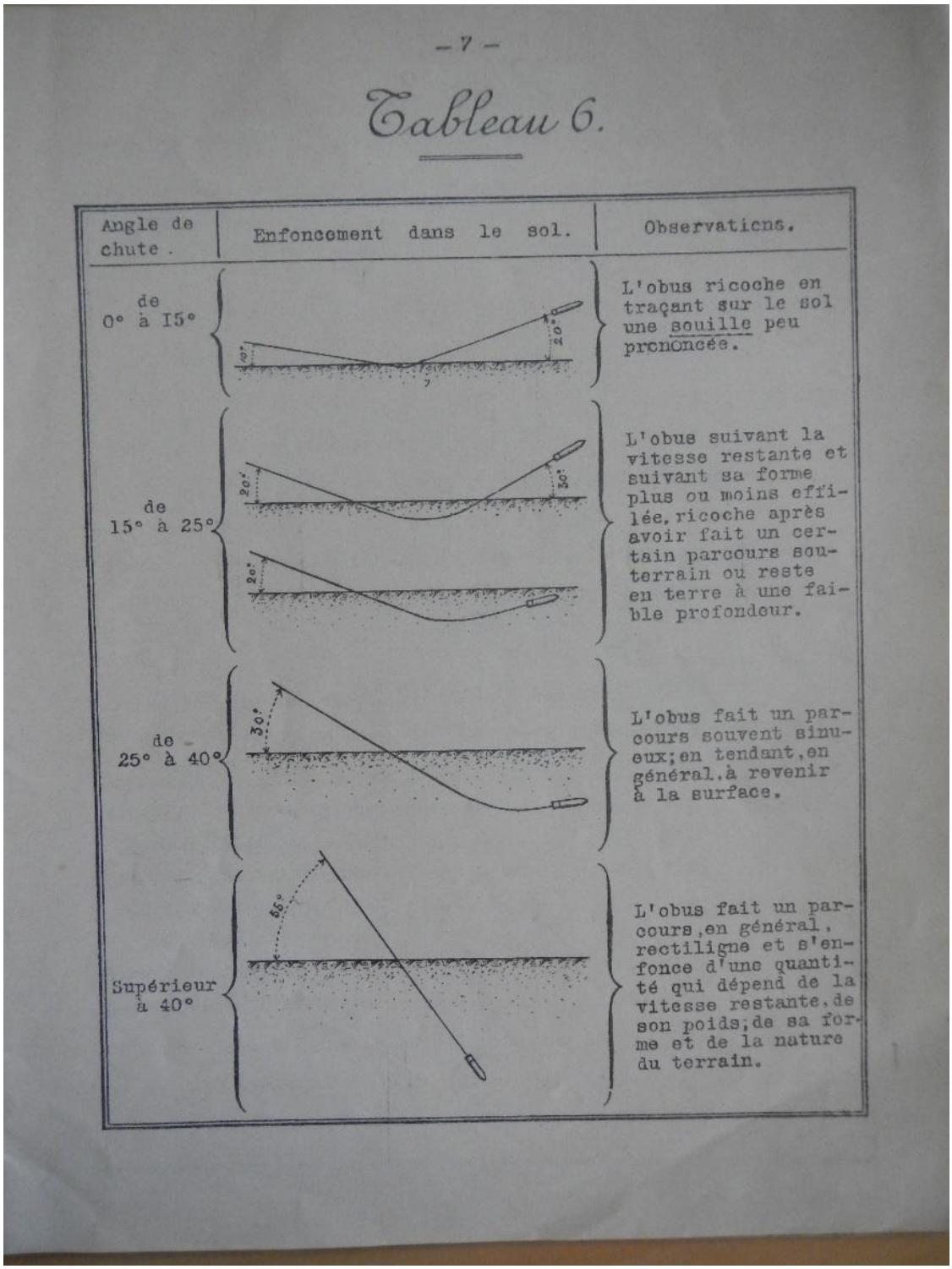
[714] Willig, D. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*. p.

Ces UXOs pouvaient ricocher à l'impact ou s'enfoncer à plusieurs mètres sous terre selon l'angle de chute, la vitesse, le poids et le profil du projectile, et la nature du sol (cf. Figure 117). Sous terre, ils suivaient une trajectoire en « J » du fait de la décélération progressive des engins. Ernst Jünger observa le phénomène dans la Somme relaté dans son récit *Orage d'acier* « *Puis un obus s'enfonçait en terre sans éclater, avec un bref et lourd ébranlement, tel que le sol alentour en était secoué*[715] ». Le « rendement » des tirs est un terme employé par les artilleurs pour désigner le ratio entre le nombre de coups tirés avec fonctionnement normal du projectile et du nombre total de coups tirés. Ces engins, qui encore de nos jours remontent à la surface à la faveur de chantiers, terrassements ou labours, forment la « pollution pyrotechnique » des sols des anciens champs de bataille.

La Figure 118, Figure 119 et Figure 120 montrent des UXOs, de divers calibres, dans différentes configuations, photographiés durant la Première Guerre mondiale. Objets de curiosité à haute portée symbolique, les soldats avaient coutume de se faire photographier en se mettant en scène au côté de ces engins, parfois redressés à la verticale, totemisés, lorsqu'ils étaient attribués à des tirs ennemis puis, notamment dans l'armée allemande, marqués à la craie blanche (cf. Figure 118) précisant le lieu, le calibre, l'origine de l'engin, puis complété par une phrase de l'empereur Guillaume II exprimant son refus de l'échec de la guerre éclair et de la guerre inscrite dans la durée.

Les UXOs se reconnaissent aisément au moment de leur découverte par leur(s) ceinture(s) rayée(s), attestant du passage du projectile dans les rayures hélicoïdales de l'âme du canon. Les munitions non tirées possèdent une ou plusieurs ceintures lisses. Ces engins, qu'il s'agisse de projectiles d'artillerie ou de grenades, ayant été tirés ou jetés, étaient armés et donc étaient ou sont encore de nos jours bien plus dangereux et sensibles lors de manipulations que les mêmes engins n'ayant pas été utilisés.

[715] Ernst Jünger, E. (1920). « Orages d'acier ». p. 326. In *1914 – 1918. Français et Allemands dans les tranchées*. Librairie Générale Française. 2013.



– 7 –

Tableau 6.

Angle de chute.	Enfoncement dans le sol.	Observations.
de 0° à 15°		L'obus ricoche en traçant sur le sol une souille peu prononcée.
de 15° à 25°		L'obus suivant la vitesse restante et suivant sa forme plus ou moins effilée, ricoche après avoir fait un certain parcours souterrain ou reste en terre à une faible profondeur.
de 25° à 40°		L'obus fait un parcours souvent sinueux; en tendant, en général, à revenir à la surface.
Supérieur à 40°		L'obus fait un parcours, en général, rectiligne et s'enfonce d'une quantité qui dépend de la vitesse restante, de son poids, de sa forme et de la nature du terrain.

Figure 117 : Trajectoires souterraines des UXOs[716].

[716] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 898. Capitaine Billard. Effets du tir de l'artillerie sur les organisations défensives. Janvier 1917.

Figure 118 : Un obus de 380 mm tirés (ceinture rayée) et non explosés exposés sous différents angles par des photographes allemands. En a) et b) il a été volontairement redressé (« totémisé ») pour la pose (la position en c) étant celle initiale). Le marquage de ces engins à la craie est une pratique courante dans l'armée allemande. L'obus central de gros calibre est marqué par un extrait d'une phrase prononcée par le Kaiser Guillaume II en août 1915 « Je n'ai pas voulu de cette guerre »[717] sous lequel les soldats ont ajouté « reste neutre » suivi d'une tête de diable. Les deux petits projectiles de part et d'autre répondent par « Moi non plus ». En bas, le même obus dans sa position initiale. Non daté. Non localisé. D.R.

[717] « *Vor Gott und der Geschichte ist mein Gewissen rein – Ich habe den Krieg nicht gewollt* » « Devant Dieu et l'Histoire, ma conscience est pure. Je n'ai pas voulu la guerre ».

Figure 119 : Obus allemand de 380 mm non explosé extrait du sol puis exhibé pour des poses photographiques lors du bombardement de Nancy en août 1916. Noter la triple ceinture au-dessus du culot de l'obus. Les rayures indiquent que l'engin a été tiré. Il a été tiré par la pièce de marine « Long Max » en batterie à Hampont, à l'est de Nancy, à proximité de Château-Salins (département de la Moselle)[718]. On notera la triple ceinture rayée au culot, attestant du passage du projectile dans les rayures hélicoïdales de l'âme du canon, un signe distinctif des munitions ayant été tirées.

[718] Archives muncipales de Nancy, cotes (de haut en bas et de gauche à droite). FRAC54395_106_Fi_1528, FRAC54395_8_Fi_254, FRAC54395_106_Fi_1530, et FRAC54395_8_Fi_255.

Figure 120 : a) Obus d'artillerie de campagne non explosé et fiché dans un tronc d'arbre au-dessus duquel les Allemands ont accroché un écriteau « Danger de mort » (« Todesgefahr »). b) Une bombe d'aviation constituée d'une bombe de tranchée allemande (« Mine ») non explosée, exhibée devant la statue de Jeanne d'Arc, au pied de laquelle l'engin est tombé. Cette scène est une allégorie de la résistance face à l'agression allemande en convoquant une effigie historique tutélaire de la défense et de la protection de la nation française face à l'invasion ennemie. Bombardement des 16 et 17 juin 1917. Eglise Saint-Léon, Nancy[719]. c) Obus français tirés et non explosés en Alsace[720].

[719] Image Est. Pôle de l'image en région Grand 'Est, cote FI-0859-0382.

[720] Carte postale allemande. Non datée. Collection particulière Hubé, D.

3.2.2 Les détonations de bas-ordre (*Low-order detonation*)

Les détonations incomplètes (déflagrations), dites « de bas-ordre » (*Low-Order Detonation*, LOD) furent observées en premières lignes et constatées sur les terrains repris à l'ennemi. On découvre encore de nos jours sur les anciens champs de bataille ces engins éventrés, car partiellement détonés, avec une partie de leur chargement encore conservé (adhérant aux projectiles ou éparpillés autour du point d'impact). L'explosif avait tendance à adhérer aux parties les plus solides des projectiles, à savoir les extrémités ogivales et les culots. La Figure 121 montre par exemple une munition déflagrée et un culot d'obus auquel adhère encore de l'explosif, au moment de sa découverte sur les anciens champs de bataille du Pas-de-Calais.

Ces déflagrations étaient causées par des défauts et malfaçons du chargement en fondu comme (i) des retassures après refroidissement des chargements des explosifs, (ii) des soufflures générées par des bulles de gaz piégées dans la masse de l'explosif une fois refroidi, (iii) des cristallisations hétérogènes des explosifs au sein de la masse du chargement du fait de températures trop basses ou trop élevées de la coulée[721].

Des défauts des chargements en comprimés furent aussi identifiés comme pouvant être à l'origine de déflagrations. Le problème des obus français de 75 mm chargés de *Schneidérite* (un explosif nitré nitraté à base de nitrate d'ammonium et de dinitronaphtalène), quand trop comprimée, était connu. Il en était de même des gaines-relais (détonateur) chargées en *Mélinite* (2,4,6-trinitrophénol), tassée à l'excès dans les ateliers de chargement. Ces défauts se multiplièrent avant 1916, date à laquelle les contrôles de qualité internes aux usines de chargement furent réintroduits.

3.3. POURCENTAGE D'INCIDENTS LORS DES TIRS

Quelle que soit la nature des projectiles, les artilleurs, ayant à ajuster les tirs par l'observation des fumées produites aux points d'impacts, avaient noté que 25 à 30% des projectiles tirés n'avaient pas convenablement explosés comme espéré. Si on retient le chiffre d'un millard de tirs d'artillerie de campagne et lourde sur le front occidental, le nombre de projectiles défaillants avoisinerait les 250 à 300 millions. A titre de comparaison, le taux d'incidents de tir durant la Première Guerre mondiale est particulièrement élevé si on considère ce qui suit.

L'USAAF (*United State of America Air Force*) largua 1,613 million de tonnes de bombes sur l'Europe durant la Seconde Guerre mondiale. D'après les professionnels du déminage, 14 % des bombes d'aviation n'auraient pas explosé. Les bombardements stratégiques alliés sur la France totalisèrent entre 1940 et 1945 environ 600 000 tonnes de bombes. Sur la base de ces chiffres, le tonnage de bombes d'aviation non explosées serait donc aux alentours de 90 000 tonnes. Le taux d'échec des munitions explosives durant la Seconde Guerre mondiale s'élevait à environ 10%, culminant avec 25% à la fin de la guerre pour les munitions allemandes. Cette surincidence des défaillances des munitions était due aux sabotages par les travailleurs forcés des camps de concentrations et des personnels du STO (Service du Travail Obligatoire) qui produisaient les projectiles[722]. Ce taux pour les projectiles contemporains serait aux alentours de 3%[723].

---

[721] Renault, P. (2016). « Les munitions de l'artillerie française de la Grande Guerre ». In *Un milliard d'obus. Des millions d'hommes. L'artillerie en 14/18*, *op. cit*. p.103.

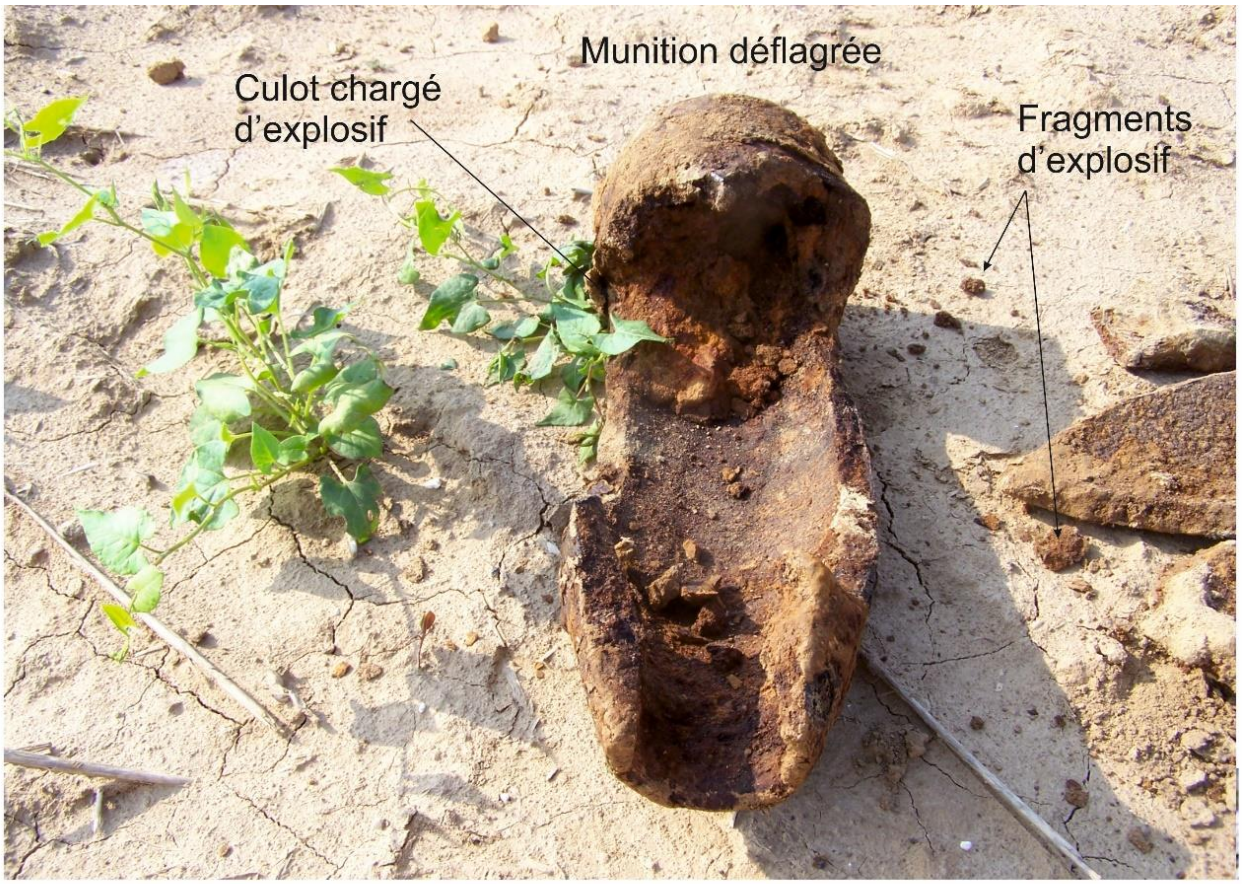
[722] Wilson, T.D. (2024). *Le déminage en Normandie. 1944 – 1948*. OREP Editions. p. 49.

[723]Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations*? *op. cit*. p.62.

De récentes recherches avancent des taux d'UXOs entre 10 et 30%, pour la guerre d'Ukraine en cours, qui sont comparables avec ceux connus des artilleurs durant la Première Guerre mondiale[724]. Ils seraient liés à l'obsolescence des matériels utilisés, hérités de l'ancienne union soviétique. Ce taux d'échec des munitions explosives varie chronologiquement selon les conflits et les modalités d'usage des moyens de l'Artillerie mais peut aussi varier considérablement d'un engin à l'autre – de 1 à 40% – durant un même conflit en raison de plusieurs facteurs tels que (i) l'ancienneté, (ii) les conditions de conservation et d'utilisation, (iii) la qualité de la conception et de la production, (iiii) le type de matériau ou de sol au point d'impact, (iiiii) les conditions atmosphériques ou encore (iiiiii) le degré de maîtrise de l'opérateur / artilleur.

La proportion de munitions déflagrées parmi les incidents de tir durant la Première Guerre mondiale n'est pas connue. Si certains projectiles ne fonctionnèrent pas normalement, il en fut de même de certaines charges souterraines (fourneaux) confectionnées pour mener la guerre de mines, à des fins offensives ou défensives. Là, comme pour les munitions déflagrées, les statistiques sont manquantes.

[724] Carroll, C. (2023). *Unexploded Ordnance Is Scattered Across Ukraine's Front Lines*. UMD Researchers Are Mapping Hot Spots With AI. Shells, Rockets Fired in Wake of Russia's Invasion Could Kill for Decades if Left in Place.



Thélus, Vimy (Pas-de-Calais). Source: Cardem-pyro

Thélus, Vimy (Pas-de-Calais). Source: Cardem-pyro

Figure 121 : Obus d'artillerie lourde déflagré (en haut) lors de sa découverte sur le terrain et culot (en bas) de projectile encore partiellement chargé d'explosif (Vimy Thelus, département du Pas-de-Calais).

4. Fourneaux de mines dysfonctionnels

Willig et al. (2015)[725] aborde de façon détaillée la question des charges offensives souterraines dysfonctionnelles ou non actionnées en centrant sa recherche sur la plus grande opération de guerre de mines jamais réalisée et l'une des rares se soldant par un succès. Préparée de longue date avec l'appui de géologues (avec à leur tête l'australien Edgeworth David), les *Tunnellers* britanniques, sous le commandement de Northon Griffith, creusèrent, sur un large front, en direction des tranchées allemandes, des galeries d'attaque dans les argiles meubles de l'Yprésien, là où les Allemands n'avaient jamais imaginé que l'ennemi puisse attaquer, puis minèrent les positions allemandes. Lors de l'offensive alliée du 7 juin 1917 (date du déclenchement de la bataille de Messines) dans le secteur de Wytschaete (crête de Messines), au sud d'Ypres, en Flandre occidentale (Belgique) (cf. Section 3h du présent manuscrit), sur les 25 fourneaux de mines britanniques initialement chargés, totalisant une quantité considérable d'explosif, 450 tonnes, seuls 19 firent réellement détonation. Une charge de près de 23 tonnes dénommée « Mine de la Petite Douve » (fourneau n°18), était positionnée sous la cour de la ferme dite « de la bassecour » au sud de Messines. Elle ne fonctionna pas le jour J. Elle fut découverte en août 1917 par les Allemands qui neutralisèrent le système de mise à feu mais l'abandonnèrent sur place. Un autre fourneau (dénommé *Peckham 2*) formé de neuf tonnes d'*Ammonal* se trouva enseveli à proximité du cratère de *Peckham*, consécutivement à l'effondrement du rameau de combat faisant suite à des venues d'eau[726]. Trois autres fourneaux, dans le secteur de la Forêt de Ploegsteert, ne furent jamais mis à feu car situés hors de la zone de l'offensive[727]. Ces charges totalisaient 48 tonnes d'*Ammonal*. La majorité des fourneaux de camouflets détonèrent et fonctionnèrent comme attendu, mais fréquemment, les charges adverses furent actionnées avant les camouflets, sectionnant les dispositifs de mise à feu et causant l'éboulement ou la compression des rameaux de combats y accédant. L'environnement géologique dans lequel ces charges se trouvaient alors était tellement perturbé et désagrégé par les détonations que leur récupération s'avéra rédhibitoire. Les zones d'explosion devenues meubles et finement fracturées, d'une tenue hasardeuse au creusement, furent contournées par les systèmes de galeries des deux parties.

5. Résumé et conclusions de la Section 4h

L'approvisionnement par l'industrie de l'Artillerie en munitions, matières explosibles et agressives, en flux tendu, était capitale dans un contexte de guerre de position où l'Artillerie tenait et dominait le front. Il fallait produire non seulement massivement des matériels divers qui satisfassent aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne, mais aussi rapidement, par un personnel qui n'était pas nécessairement expérimenté et aguerri au travail dans des usines dangereuses comme celles de production de poudres et explosifs et les ateliers de chargement de munitions. Satisfaire les objectifs de rendement signifiait (i) des écarts aux mesures de sécurité les plus élémentaires au poste de travail (ii) privilégier les quantités à la qualité des matériels et matières produits puis livrés aux armées. Les conséquences de cette situation s'avérèrent catastrophiques pour les hommes et le matériel, par des intoxications du personnel, des explosions accidentelles d'usines et l'anéantissement de pièces d'artillerie et de leurs servants lorsque les munitions étaient défectueuses (accidents de tir).

---

[725] Willig, D., Rose, E. P.F., Allersmeier, C., Doyle, P. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdients der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*.

[726] Robinson, P. (in preparation). *The Abandoned Messines Mines*. Manuscrit non publié.

[727] National Archives, Kew Gardens, London, number WO 158/151.Hudspeth, H. (1971). Information manuscrite. Maj. Henry Hudspeth R.E. 171th TC from 22/09/17 to the Controller of Mines 5th Army.

Un quart des milliards d'engins tirés ne fonctionnèrent pas comme escompté. Le nombre de projectiles défaillants non explosés (conséquences des incidents de tir), ou « UXO » (*UneXploded Ordnances*) avoisinerait les 250 à 300 millions. Ces engins ricochèrent à la surface ou s'enfoncèrent dans les sols à des profondeurs variables selon les caractéristiques des projectiles et de leurs trajectoires et des propriétés intrinsèques des sols. Ils vinrent consteller, polluer de façon pyrotechnique, la surface et les sols des champs de bataille intensément bombardés. Ces engins, armés au moment du tir, sensibles à toute sollicitation, restèrent toujours en puissance d'explosion.

Sous terre aussi, des charges explosives offensives ou défensives de guerre des mines ne fonctionnèrent pas systématiquement et dorment pour certaines toujours sous nos pieds, lorsqu'elles ne se manifestent pas par des explosions spontanées, tardives, spectaculaire, et fort heureusement rares. Leur dénombrement et localisation précise semblent délicats à établir.

Ces Restes Explosifs de Guerre (REG) générés par le premier conflit mondial et abandonnés sur et aux abords des champs de bataille forment un ensemble très hétérogène de matériels qui reflètent la grande diversité des engins de guerre et de leurs chargements. Il s'agit de munitions tirées non explosées ou partiellement détonées, de munitions, matières et matériels explosibles inutilisés et abandonnés, et des charges souterraines dysfonctionnelles et délaissées. Leur abandon leur attribua le statut de déchets de guerre. Ils portaient en eux des problématiques et enjeux nouveaux qui apparurent puis s'affirmèrent au cœur de la guerre.

Section 5h.
Récupération et destruction des Restes Explosifs de Guerre dans la dynamique de la Grande Guerre

1. Introduction de la Section 5h.

« De plus la nécessité du Salvage est une production de cette Guerre ; jamais auparavant ce besoin ne s'était imposé; c'est une chose nouvelle, une nouvelle leçon à enseigner et à apprendre »[728]

L'usage et la consommation inédits des moyens de l'Artillerie dans la Grande Guerre et en cascade la mise sous tension de l'industrie, puis de son approvisionnement en ressources minérales et énergétiques pour satisfaire les besoins énormes et urgents des armées en campagne, amenèrent les états-majors à (i) optimiser au front l'usage de ces matériels mais aussi à (ii) récupérer ce qui avait été abandonné sur le terrain et potentiellement encore utilisable, sans ou après réfection.

Les sols des terres agricoles, ces champs de blé des plaines de Champagne et de Picardie, dont la Grande Guerre fit des champs de bataille, étaient avant-guerre parmi les plus fertiles du territoire métropolitain. L'intensité des bombardements et les taux élevés d'engins défectueux non explosés (conséquences des incidents de tir, cf. Section 4h) les avaient transformés dès 1914 en champ de mines, impropres en l'état à une remise en culture immédiate suivant des pratiques courantes du temps de paix. De grandes quantités de matériel inutilisées avaient aussi été abandonnées à la faveur de la confusion des combats.

Les armées de toutes les parties s'organisèrent durant la guerre pour réduire le gaspillage, récupérer les matériels abandonnés susceptibles d'être réutilisés et détruire à des fins militaires et/ou sécuritaires les Restes Explosifs de Guerre (REG), et ainsi résorber cette pollution pyrotechnique qui encombrait les terrains libérés et anciennement bombardés, pour les restituer, au cœur de la guerre à leur usage premier et ordinaire.

La problématique de la récupération et de la neutralisation des restes de guerre est aussi ancienne que l'Artillerie. Elle était connue des militaires depuis les premiers conflits sollicitant fortement l'Artillerie. Les modalités de la récupération évoluèrent avec l'évolution technologique des moyens de l'Artillerie et de ses projectiles. Mais la récupération visait depuis la seconde moitié du XIXe siècle des restes de guerre d'un genre nouveau. Les REG n'étaient plus ces restes photographiés durant la Guerre de Sécession, de Crimée (cf. Figure 123) ou encore celles des Balkans (cf. Figure 122), des objets inertes (boulets pleins) ou encore explosifs, rudimentaires et isolés.

Les REG devinrent avec l'usage massif et généralisé des obus explosifs et chimiques modernes d'une grande diversité, des objets dangereux, au potentiel d'attrition conservé bien après qu'ils eussent été abandonnés. L'usage durant la Première Guerre mondiale d'une Artillerie moderne, puissante, à une échelle encore jamais vue dans les conflits antérieurs, projeta ces problématiques de récupération et d'élimination des REG, jusque-là reléguées aux marges des problématiques liées aux conflits armés, au premier plan de la guerre et des préoccupations des civils comme des militaires. Ces opérations prirent durant la Grande Guerre, au même titre que l'usage des munitions, des proportions et une importance exceptionnelles et inédites.

[728] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Rapport sur la méthode employée par l'Armée britannique pour la récupération de matériel abandonné. Non daté.

La présente section du manuscrit expose, en suivant un fil conducteur chronologique (i) les enjeux et l'émergence d'une nécessité de la récupération syn-conflit, (ii) les dispositions organisationnelles prises par les Etats-Majors des parties belligérantes pour y répondre et (iii) les méthodes et moyens employés pour récupérer mais aussi pour détruire les REG irrécupérables.

Figure 122 : Tentative de neutralisation d'un obus non explosé ottoman par des soldats serbes à Adrianople (actuelle Edirne en Turquie européenne) lors de la première guerre balkanique (1912-1913)[729].

[729] Balkan Wars 1912-13 - Photo Gallery - Part 2. https://macedonia1912-1918.blogspot.com/2017/01/balkan-wars-1912-13-photo-gallery-part-2.html

Figure 123 : Restes de guerre en Crimée. 1856. Une incertitude demeure pourquoi les boulets furent déplacés des fossés sur la piste. Il s'agit possiblement d'une intention du photographe d'accroître chez le spectateur le sentiment de désolation et la stupeur face à ces reliques figées d'une spectaculaire densité de feu de cette guerre préindustrielle. Une autre hypothèse serait que ces boulets auraient été volontairement déplacés par les soldats dans la perspective de leur récupération et de leur réutilisation ultérieure[730].

[730] Musée d'Orsay. Roger Fenton (1819-1869). *The Valley of the Shadow of Death*. www.musee-orsay.fr. Archived from the original on 8 December 2008.

1.1. 1914. EMERGENCE DE PROBLEMATIQUES INEDITES ENTRE MARNE ET AISNE

L'émergence des problématiques liées aux munitions abandonnées sur et dans les sols est consubstantielle aux premières batailles majeures de la Première Guerre mondiale. Elles virent non seulement le déploiement et le recours massif aux moyens de l'Artillerie mais aussi le mouvement, parfois infime, des lignes de front, libérant des espaces jusqu'alors intensément pilonnés susceptibles de retrouver des usages presqu'ordinaires en marge de la guerre. En effet ce fut sur les territoires libérés au terme de la première bataille de la Marne que cette problématique s'imposa dès 1914 aux yeux des autorités civiles comme militaires. Il s'agissait de territoires ruraux en partie encore occupés par des civils (cf. Figure 124).

La poussée française sur la rivière Marne de septembre 1914 en direction de la rivière Aisne s'effectua sur les territoires des 2e et 6e Régions militaires, régions qui furent de fait les premières directement concernées dans la guerre par l'enjeu des REG. Il s'agissait pour l'essentiel de munitions délaissées par les Allemands lors de leur repli et celles tirées, non explosées, par les Français. Ce sont les correspondances entre les autorités civiles (préfets) et militaires (GQG, Commandement de la Région militaire) conservées aux archives départementales de la Marne, de la Meuse et au Service Historique de la Défense, portant sur la 6e Région qui les premières relatent l'existence de ces engins et pointent les risques qu'ils firent encourir aux populations civile non averties aux dangers de ces armes « *Après les combats qui ont eu lieu et qui se livrent encore journellement sur tout le territoire de la 6e Région*, il importe *d'attirer immédiatement l'attention des populations sur le danger qu'il y a à relever ou même toucher les obus trouvés intacts sur le champ de bataille*. *Les fusées de ces obus pouvant être armées, le moindre choc ou mouvement peut déterminer l'éclatement du projectile* [731]».

Figure 124 :Civils glaneurs d'obus encartouchés allemands de 77 mm abandonnés dans un champ après la première bataille de la Marne. Non localisé[732].

[731] Archives départementale de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213.VIe Corps d'Armée. Etat-Major. Le Général ~~Sarrail~~ Commandant la VIe Armée à Monsieur le Préfet de la Marne. Châlons-sur-Marne, le 19 septembre 1914.

[732] Library of Congress. Prints and Photographs Division Washington, D.C. Bain News Service photograph collection. 1914 Oct. 29, number LC-B2- 3277-15.

Les enjeux liés aux REG étaient donc d'abord, aux yeux de l'autorité militaire, sécuritaire en se préoccupant d'abord de la protection des populations dont elle était responsable. Les victimes civiles d'explosions accidentelles liées à des manipulations malheureuses d'engins de guerre dispersés et abandonnés sur les anciens champs de bataille étaient considérées comme des victimes de guerre et à ce titre étaient redevables de dédommagements par l'Etat. Mais les enjeux liés à ces matériels encombrant les sols reconquis ne sauraient se limiter aux dimensions sécuritaires et pécuniaires pour l'Etat.

L'invasion allemande en direction de Paris en août 1914, la débâcle puis le sursaut français sur la Marne en septembre 1914 avaient balayé un vaste territoire sur lequel, entre les rivières Marne et Aisne, les civils étaient présents, essentiellement des paysans attachés à leurs terres très fertiles. Les hommes et chevaux des armées françaises et allemandes étaient exténués au terme de la première bataille de la Marne; les Français étaient bien incapables dans ces conditions de fournir l'effort militaire comme logistique nécessaire pour une percée décisive des lignes allemandes. Par ailleurs « *La situation est encore aggravée […] par l'impossibilité d'assurer le ravitaillement total des armées en raison du mauvais état des routes et de la fatigue des chevaux* [733]». Les longues marches, les difficultés d'approvisionnement en nourriture, le poids des lourdes pertes subies affectèrent le moral des troupes et nuisirent à la bonne discipline des marches. Subvenir aux besoins des armées en nourriture, en fourrage pour les chevaux, au plus près de leurs marches, était aussi essentiel que l'approvisionnement en munitions et la manœuvre militaire.

Dans la géographie militaire et la division horizontale du territoire opérée par les armées parallèlement au front (la zone avancée ou zone de l'avant aux abords immédiats de la ligne de feu), ces espaces reconquis sur l'adversaire allaient devenir dans la guerre de position qui suivit dès la phase de mouvement de l'été et de l'automne 1914, les futures zones des armées et plus précisément la partie de la zone des armées la plus proche de l'avant, dénommée la zone des étapes.

Les autorités militaires et civiles cherchèrent conjointement à remettre en culture au plus vite les sols agricoles des territoires reconquis sur l'ennemi de la zone des étapes. Cette reprise de l'activité agricole au plus près du front avait clairement plusieurs visées. Cette bande de terrain parallèle et attenante au front remise en culture devint le « grenier à blé » rapproché des Français, nécessaire pour alimenter en flux tendu, avec des circuits logistiques raccourcis, la masse des troupes à l'avant et leurs chevaux. L'armée allemande du printemps 1918 en France ne fut-elle pas mise en difficulté, par sa vitesse de progression et en corolaire l'éloignement trop rapide de ses bases logistiques et de ravitaillement ? Les soldats au repos pouvaient aussi s'alimenter avec ce qui manquait au front, fruits et légumes frais. Ces exploitations agricoles contribuèrent « à *maintenir nos troupes en bonne santé en leur fournissant en abondance des légumes frais, légumes qui leur faisaient totalement défaut dans certaines régions des Vosges, de Champagne et de la Meuse*[734] ». En résumé, récupérer les REG sur ces territoires agricoles à grande valeur ajoutée, c'était sécuriser (i) le travail au champs des populations paysannes et par cette entremise (ii) l'approvisionnement de l'armée et de l'avant en denrées alimentaires et fourrage. Ces opérations devaient «*permettre aux agriculteurs d'effectuer leurs travaux sans dangers*[735] ». Enfin, la libération de ces sols, retournés sous le giron national, en les débarrassant des engins abandonnés du temps de guerre, pour les réaffecter à des usages ordinaires du temps de paix, pouvait aussi possiblement porter une dimension symbolique.

---

[733] Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande Guerre. Tome deuxième. 2* / Ministère de la Guerre, Etat-Major de l'armée, service Historique. 1930. Ve Armée. Lettre au commandant général en chef, 1204-20 septembre 1914.

[734] Bibliothèque nationale de France. Truffaut, G. (1918). « *L'agriculture & la guerre », La Gloire de la France*. Emile Paul, Libraire.

[735] Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213, lettre du Sous-Préfet de l'arrondissement d'Epernay à Monsieur le Préfet de la Marne, Epernay le 25 octobre 1914.

La majorité des combattants français était issue du monde paysan que la mobilisation arracha brutalement à l'été 1914 de leurs terres au beau milieu des moissons, laissant les exploitations aux mains des femmes « *intrépides diriger les attelages, peiner dans les sillons, et retourner les lourds branlants*[736] ». Pour ces paysans sous les drapeaux (cf. Figure 125), retrouver une vie au champ lors de leurs repos constituait indéniablement une satisfaction mais surtout un devoir moral, pour la nation et leur famille « *Nos soldats agriculteurs ont saisi avec empressement toutes occasions de se rendre utiles, et c'était admirable de les voir, dès leur arrivée dans les cantonnements de repos, se mettre à la disposition des vieux cultivateurs pour les aider à labourer, herser ou semer leurs champs, couper les foins, à faire la moisson et les vendanges*[737] ». Ainsi « *Pendant leurs courts instants de loisirs, les soldats au front retrouvent avec plaisir la charrue, la herse et la faux […]*[738] ».

Figure 125 : Fauchage des foins par les soldats cultivateurs[739]

Dans la zone des étapes, la présence des civils et de la main d'œuvre agricole était encore possible. Une coordination étroite entre l'autorité civile locale (maires et préfets) et l'autorité militaire s'imposa d'emblée pour satisfaire aux objectifs sécuritaires et militaires de la récupération. Cette coopération se devait d'être renforcée du fait de pénuries de cette main d'œuvre en lien avec (i) les départs volontaires de certains civils à la recherche de terres moins vulnérables aux soubresauts de la guerre, ou encore avec (ii) la mobilisation de la population paysanne (sous occupation en août et septembre 1914) dans l'armée française. Les terres agricoles abandonnées était réquisitionnées par l'autorité militaire et le travail de la terre incité par l'armée et les maires[740]. L'exploitation agricole des sols y fut menée par une coopération étroite entre les civils et l'autorité militaire. Différentes initiatives de remise en culture des sols furent tentées, promues et aidées par l'armée (et son représentant, « l'officier fermier »)[741] et le Service agricole des armées « *Grâce à l'organisation du Service agricole des armées, l'aide apportée par les militaires à l'agriculture au front a été extrêmement bienfaisante, et ce ne sont pas les terres les plus proches des lignes qui ont été les plus négligées pendant la guerre. Peu à peu, l'idée qu'il fallait intensifier la production locale s'imposait aux chefs de notre armée, et c'est ainsi que naquirent les nombreux jardins militaires […]*[742] ».

---

[736] Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213, lettre du Sous-Préfet de l'arrondissement d'Epernay à Monsieur le Préfet de la Marne, *op. cit.*

[737] Bibliothèque nationale de France. Truffaut, G. (1918). « *L'agriculture & la guerre ». La Gloire de la France*, *op. cit*.

[738] *Ibid.*

[739] *Ibid.*

[740] Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 140 M 17, Lettre du Préfets au Ministère de l'Agriculture du 18 septembre 1917.

[741] Dautresme, D. (1919). *Les conséquences de la guerre en Seine-et-Marne: étude historique, administrative et économique* (Melun: Legrand, 1919).

[742] Bibliothèque nationale de France. Truffaut, G. (1918). « *L'agriculture & la guerre ». La Gloire de la France*, *op. cit.*

Le travail de la terre devait être opéré dans cette partie de la zone des armées avec une extrême prudence du fait de la présence possible sur ou dans les sols de matériels dangereux et explosible. Quelques semaines seulement après les combats de la première bataille de la Marne, un ensemble de consignes fut émis par les représentants des autorités civiles et militaires pour informer les populations, faciliter le repérage des REG et organiser leur récupération. C'est ainsi que l'autorité préfectorale dut « *prescrire aux maires de signaler directement à M. Le Général Commandant l'Artillerie de la 6e Région, à Chalons, les projectiles non éclatés*[743] ».

Il fut alors de la responsabilité des municipalités de « *fournir tous renseignements utiles et l'aide nécessaire* [744]», notamment en matérialisant sur le terrain l'emplacement des engins dangereux à neutraliser « *par un signal, tel que branche d'arbre fichée en terre* [745]». Il est question ici du champ de bataille du secteur de Sézanne (département de la Marne). Le général Pistot commandant la 6e Région militaire, informa les préfets de la Meuse[746] et de la Marne[747] par un courrier daté du 19 septembre 1914 des dangers que constituent les projectiles non éclatés affleurant sur le champ de bataille et demanda que des actions préventives d'information des populations civiles furent engagées. Des affiches et pancartes destinées aux populations civiles furent distribuées, placardées sur les lieux publics, sur lesquelles on pouvait lire « *Attention ne touchez pas aux munitions » « Méfiez-vous des dispositifs de mine », ou encore «Interdiction de récupérer, démonter et négocier les munitions et épaves métalliques abandonnées sur le champ de bataille* »[748].

Les travaux et tâches de la récupération et de la destruction sur place des REG non récupérables (dont la manipulation et le transport étaient jugés beaucoup trop risqués) furent rapidement attribués aux personnels compétents en matière de munitions et d'explosifs, à savoir ceux de l'Artillerie et du Génie. Le 27 septembre 1914, le Général Pistot annonça par un courrier au préfet de la Meuse qu'il dépêchait un artilleur dans chacune des communes concernées[749]. Les projectiles étaient détruits sur place dans les communes ayant fait leur signalement. «*Il conviendrait que le service de l'artillerie procédât le plus rapidement possible à leur enlèvement*[750]». Ces personnels rattachés à l'Artillerie ou au Génie possédaient l'expérience de la manipulation des engins de guerre et de leur destruction (par des artificiers), mais ils s'avérèrent en effectifs bien insuffisants pour satisfaire les nombreux signalements et demandes. Dans le contexte de la guerre, la priorité des personnels de l'Artillerie restait le combat. Par ailleurs durant la guerre de mouvement qui marqua la seconde moitié de l'année 1914, l'Etat-major avait tout misé sur la formation de nombreux bataillons d'infanterie au détriment d'unités du génie, de logisticiens et de techniciens, c'est à dire de personnels compétents pour gérer les flux de projectiles abandonnés transportables et la destruction de ceux jugés intransportables.

---

[743] Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213, lettre du Sous-Préfet de l'arrondissement d'Epernay à Monsieur le Préfet de la Marne*, op. cit.*

[744] *Ibid.*

[745] *Iibid.*

[746] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571. Courrier du Général Pistot, commandant la 6e Région militaire, au Préfet de la Meuse.

[747] Archives départementale de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213. Courrier à l'attention de Monsieur le Préfet de la Marne du Général ~~Sarrail~~. Commandant le VIe ~~Corps de l'Armée~~ Région.

[748] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 N 82.

[749] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571.Courrier du Général Pistot, commandant la 6e Région militaire, au Préfet de la Meuse, 27 septembre 1914.

[750] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571, lettre du Général Joffre, commandant en Chef de l'Armée Française au général Pistot, commandant la 6e Région militaire, 25 septembre 1914.

Le Général De Grandpray (Directeur des Etapes et des Services de la IIIe Armée) avait averti le préfet de la Meuse dans son courrier du 17 septembre 1914 que le travail de destruction des engins abandonnés serait long en raison de l'étendue du terrain sur lequel intervenir et du faible effectif du personnel technique alloué à cette tâche dont il disposait[751]. Les opérations de destruction de munitions furent tant bien que mal engagées dès septembre 1914. Le 17 septembre 1914, le préfet de la Meuse fut ainsi informé par le Général De Grandpray que ses services avaient commencés à faire exploser les projectiles abandonnés sur le champ de bataille[752] à Julvécourt[753] et fin octobre 1914 à Rembercourt et sur le territoire compris entre Beauzée-sur-Aire et Le Vaux-Marie[754].

1.2. PREMIERES INSTRUCTIONS POUR LA RECUPERATION AU SEIN DE L'ARMEE FRANÇAISE

Ensuite dans le contexte de l'automne 1914, marqué par de grandes tensions entre les besoins inattendus et non anticipés des armées en munitions d'artillerie et les capacités d'approvisionnement, et son apogée avec la Crise des munitions (cf. Section 3h du présent manuscrit), les armées en campagne cherchèrent aussi à limiter autant que possible la consommation de munitions. Elles reçurent des ordres pour limiter le gaspillage des moyens d'artillerie, cesser la canonnade sans but défini, en recevant aussi des consignes pour ménager les obus explosifs en privilégiant les tirs d'obus à balles. C'est ainsi que tous les engins ou éléments de munitions, abandonnés, transportables dans des conditions de sécurité satisfaisantes et potentiellement réutilisables (après une éventuelle réfection), cherchèrent à être récupérés. La récupération s'opéra sur les secteurs occupés par les armées immobilisées, celles du centre, en particulier les Ve et IVe Armées stationnées dans la Marne et en Meuse.

Joseph Joffre, souligna ainsi par son courrier du 25 septembre 1914 au Général Pistot, en informant par ailleurs les préfets de la Meuse et de la Marne, de l'intérêt à collecter et à envoyer vers l'arrière toutes les douilles d'obus de canon de campagne de 75 mm et précisa que « *la rapidité de réfection de nos munitions en dépend*[755] ». Pour faciliter cette récupération, le Ministre de la Guerre, Alexandre Millerand, décida d'accorder une prime incitatrice de 2 Francs pour toute douille récupérée[756]. Ces instructions émanant à la fois du GQG et à la fois du Gouvernement étaient symptomatiques de l'urgence à reconstituer des stocks de munitions suffisant pour alimenter l'effort de guerre, sur fond de Crise des Munitions et sécuriser les gains militaires suite à la victoire française sur la Marne.

D'autres motivations militaires de la récupération, bien que non explicitement exprimées dans les archives consultées, ne peuvent être écartées à ce stade des recherches : la fragilité de la situation militaire au début de la Première Guerre mondiale rendait la reprise par l'adversaire du matériel abandonné toujours possible.

---

[751] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571. Courrier du Général De Grandpray, directeur des Etapes et des Services de la Ier Armée au Préfet de la Meuse, 17 septembre 1914.

[752] *Ibid.*

Archives départementales de la Meuse, cote 1251 W 571. Lettre de M. Fléaux, Maire de Julvécourt au Préfet de la Meuse du 27 septembre 1914.

[754] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571. Lettre du Général De Grandpray, *op. cit.*

[755] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571, lettre du Général Joffre, commandant en Chef de l'Armée Française au général Pistot, commandant la 6e Région militaire, 25 septembre 1914.

[756] *Ibid.*

1.3. 1916 ET LE COMITE INTERMINISTERIEL POUR AIDER A LA RECONSTITUTION DES REGIONS ENVAHIES. ATTENDRE OU POURSUIVRE ?

C'est au Ministère de l'Intérieur que se constitua un service spécial pour la reconstitution des régions envahies (par Arrêté ministériel du 30 avril 1916). Pour coordonner tous les efforts qui couvrent les compétences de plusieurs départements ministériels, fut créé un « Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des Régions Envahies ou atteintes par fait de guerre » (décret d'application du 18 mai 1916). La question de la pertinence de la récupération des REG au cours des hostilités ressurgit durant le second semestre 1916 à l'initiative du Comité Interministériel, confiant dans le bon déroulement des vastes opérations en cours à Verdun et dans la Somme qui devaient se traduire *in fine,* comme en 1914 sur la Marne, par la reconquête de territoires jusqu'alors occupés par les Allemands. En 1916, les Français imaginaient déjà reconstruire et se projeter dans le monde de demain. Arrêtons nous ici sur le terme, « reconstitution » employé dans le titre du Comité Interministériel. Il apparaît dès 1916 et fut largement employé par l'administration dans les années d'immédiat après-guerre «*Ce terme désigne le rétablissement dans sa forme et dans son état d'origine d'une chose disparue, ce rétablissement ayant lieu dans la réalité ou par la pensée*[757]». La reconstitution fut une utopie rapidement enterrée car rien, ni choses, ni pensées, ne pouvait être comme avant la guerre, et restauré dans un état identique à l'initial, après le choc et les bouleversements de la Première Guerre mondiale. On lui préfèra le terme de « reconstruction», qui fut employé jusque dans les années 1930.

Le Comité Interministériel chercha à s'assurer auprès de l'autorité militaire, du GQG, que les armées en campagne procédassent effectivement à l'enlèvement des projectiles abandonnés selon les instructions officielles et que les populations civiles amenées à côtoyer ces engins fussent bien informées de leurs dangers. Les « *mesures prises pour débarrasser le sol des obus grenades et artifices non éclatés* » fit l'objet de la note du GQG (Direction de l'Arrière) du 31 août 1916 à l'attention de la 2e Section du Comité Interministériel (Reconstitution des Régions envahies ou atteintes par les faits de guerre)[758].

Si la nécessité de la reprise des cultures sur les anciens champs de bataille libérés fut indiscutable et consensuelle au sein du GQG, avec en prérequis – pour des raisons sécuritaires - l'enlèvement des REG, ce fut plus généralement la question de sa pertinence en temps de guerre qui suscita un débat, celui de la main d'œuvre allouée à cette tâche. Pour l'Armée, la question des effectifs militaires affectés aux opérations de récupération se posa avec d'autant plus d'acuité qu'avec les hécatombes sur les champs de bataille de 1914, 1915 (Champagne, Artois notamment) et 1916 (Verdun et la Somme), les effectifs combattants avaient été durement entamés. « *La pénurie de main d'œuvre étant particulièrement sensible pendant la période des hostilités, la question peut se poser de savoir s'il y a lieu d'engager l'exécution de ces travaux avant la démobilisation. La réponse à cette question ne saurait être négative. Elle s'est déjà posée depuis plus d'un an dans les départements réoccupés à la suite de la bataille de la Marne. Depuis notre avance progressive dans la région de la Somme la fait envisager de nouveau, et d'ailleurs il est visible que l'on ne saurait différer plus longtemps le retour des populations sur les territoires libérés. On observera toutefois, que tant que la Guerre ne sera pas terminée, l'insuffisance de la main d'œuvre et la limitation des moyens d'exécution, ne permettront pas de mener à bien la totalité des travaux à entreprendre*[759].

---

[757] Bibliothèque nationale de France. Viézat, E. (2001). *La reconstruction de l'Aisne. Société archéologique de l'Aisne*, *op. cit*. p. 127.

[758] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN4-411. Note du GQG (Direction de l'Arrière) du 31 août 1916 à l'attention de la 2e Section du Comité Interministériel (Reconstitution des Régions envahies ou atteintes par les faits de guerre).

[759] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4-411. Ministère de la Guerre au Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des Régions dévastées. 2e Section – Reconstitution du sol, des voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale. Note au sujet des conditions dans lesquelles pourrait être exécutés la démolition des travaux défensifs (abris souterrains, tranchées bétonnées, etc.). 26 octobre 1916.

Pour l'Armée, satisfaire les instructions du Comité Interministériel, c'était prélever au sein des unités combattantes, déjà amenuisées, des personnels pour les affecter à des tâches non combattantes de récupération, mais non dénuées de risques. Pour le Comité Interministériel, la remise en état des sols agricoles par des travaux de récupération ne devaient en aucun cas attendre la démobilisation des personnels sous les drapeaux, consécutive à une cessation des hostilités.

Le GQG et le Comité Interministériel avaient bien conscience de l'ampleur de la tâche, des difficultés à trouver les personnels compétents pour réaliser la récupération et donc du caractère superficiel, long et fastidieux de l'enlèvements des REG. Le nettoyage du champ de bataille entrepris par les armées était « *une opération forcément superficielle dont la bonne exécution est subordonnée aux effectifs disponibles et qui n'est étendu au sous-sol que dans un petit nombre de circonstances favorables. La zone reconquise se présente actuellement avec un petit nombre d'îlot bien nettoyés*[760] ».

Le recours à la main d'œuvre des Prisonniers de Guerre (PG) allemands pour l'exécution des tâches dangereuses de la récupération fut donc dans ce contexte privilégié pour faire aussi porter à l'ennemi les conséquences de ses actes en l'exposant à des risques dont il était responsables tout en limitant l'appel aux personnels français d'unités combattantes « *Il semble donc tout à fait légitime de faire se porter à l'envahisseur tout le poids possible de cet effort et de prélever tout d'abord, sur les prisonniers de guerre, les travailleurs nécessaires pour l'accomplissement de cette tâche ardue et périlleuse. Ce sera, en outre, le moyen de réserver pour des emplois plus fructueux et plus faciles la main d'œuvre nationale que la force des choses est destinée à rendre peu abondante et extrêmement chère*[761] *».* Les PG furent bel et bien affectés par l'armée française à des tâches ingrates, comme le désobusage mais aussi à l'enlèvement et à la mise en terre des morts (cf. Figure 126). Les archives ne précisent pas si les PG furent effectivement sollicités pour la récupération des REG durant les hostilités.

D'autres freins vinrent entraver le caractère exhaustif de l'enlèvement des engins de guerre : certaines ruines, susceptibles de renfermer des engins, n'étaient pas accessibles, la végétation, la boue ou l'eau des flaques et mares constellant le champ de bataille pouvaient aussi dissimuler les projectiles[762].

---

[760] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4-411. Ministère de la Guerre au Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des Régions dévastées, *op. cit.*

[761] *Ibid.*

[762] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Enlèvement de projectiles. Note pour la 2e Section du Comité Interministériel (Reconstitution des régions envahies ou atteintes par les faits de guerre). Au GQG, le 31 août 1916. Non signé.

Figure 126 : Colonne de Prisonniers de Guerre (PG) allemands portant au cimetière (provisoire ?) des soldats tombés au combat. Les croix noires à l'arrière-plan laissent penser que ces PG allemands s'apprêtent à inhumer des soldats de leur propre camp. Vraisemblablement vers 1915. Non daté, non localisé[763].

Afin de limiter les risques d'explosion accidentelle d'engins résiduels dans le cadre d'une récupération partielle et non exhaustive, pour protéger malgré tout la population civile, les autorités misèrent comme en 1914 sur des campagnes d'information en appelant à la plus grande vigilance. Une note du GQG du 31 août 1916 précisait les mesures visant à débarrasser les sols des obus, grenades et artifices non éclatés. « *Il ne paraît pas possible de supprimer absolument tout danger dans la remise en culture du sol et surtout dans les travaux de reconstruction des villes et des villages* » « *d'où l'on retiendra que les travaux envisagés seront toujours, quoiqu'on fasse, d'une exécution dangereuse* ». Ainsi, « *seule une grande prudence de la part des cultivateurs et des ouvriers pourra diminuer les chances d'explosions* ».

En 1916, comme précédemment en 1914, la remise en état des sols, menée durant la guerre, restait une priorité pour le Ministère de la Guerre. La note du Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des Régions Envahies du Ministère de la Guerre du 26 octobre 1916[764] fit figurer ces opérations parmi les travaux prioritaires, pour rendre la surface du sol dans un état tel qu'il permette sa remise en culture par l'enlèvement des obstacles de défense de toute nature, comblement des tranchées, boyaux, puisards et puits, nivellement des trous d'obus et des entonnoirs de mine, destruction des plateformes de pièces d'artillerie bétonnées ou non, démolition des ouvrages ouverts et tranchées renforcées, etc.

[763] Collection particulière, Offroy, C. Probablement dans le secteur du Bois-le-Prêtre (département de la Meurthe-et-Moselle)

[764] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 – 411. IIe Section – Reconstitution du sol, des voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale, *op. cit.*

Ces travaux dits de première catégorie offrirent aussi l'opportunité de récupérer des matériels et matériaux réutilisables et/ou valorisables à des fins militaires « *Ils devraient comprendre en outre la recherche des matériaux et objets divers susceptibles d'utilisation ultérieure* »[765] (par exemple, boucliers, cuirassements, matériaux de blindage, bois, béton, pompes et canalisations diverses, câbles électriques, etc.).

La récupération était l'affaire des militaires et était opérée en deux temps sur les terrains reconquis (i) un premier dégrossissage avec la main d'œuvre militaire et/ou l'emploi des PG par les troupes des Etapes, mais qui restait incomplet et superficiel, puis (ii) une phase de parachèvement « *faisant appel à toutes les ressources de l'outillage le plus perfectionnés*[766] », c'est-à-dire possiblement des engins mécanisés et autres motoculteurs.

Ces préoccupations furent partagées par les armées alliées engagées militairement sur le front occidental.

1.4. 1916. RECUPERATION PAR LES *SALVAGE.* UNE PREOCCUPATION INTERALLIEE

La récupération s'affirma dans les corps expéditionnaires britanniques (*British Expeditionary Force*, BEF) et américains (*American Expeditionary Force*, AEF) plus encore que dans les armées françaises et allemandes, comme essentielle dans la conduite de la guerre loin de leurs bases logistiques et de leurs approvisionnements, il fallait se débrouiller avec ce que pouvait ou ne pouvait pas livrer le terrain. Ces corps expéditionnaires en Europe étaient dépendants des approvisionnements locaux « *because of the greater distance from source of supplies, and difficulties in transportation* [767] ».

En 1916, le GQG voulait s'assurer que les efforts de la récupération française furent bien partagés par les Britanniques, s'agissant de préserver les sols et la population française. Le GQG[768] invita par un courrier du 27 novembre 1916 son homologue britannique, à se conforter aux dispositions françaises. L'enlèvement ou la destruction des engins dangereux devaient ainsi être exécutés sans retard, et autant que le permettaient les circonstances, au jour le jour. Le lieutenant-colonel de Bellaigue de Bughas signala au lieutenant général du quartier général britannique (*Great Quatermaster,* GQM), par son courrier du 13 novembre 1916 que l'autorité militaire française ne saurait se satisfaire des pratiques usuelles des troupes britanniques consistant, en cas de découverte d'engins non éclatés, à les recouvrir de terres ou à les enfouir. En réponse, le GQM assura mettre en œuvre tout son possible, au regard des exigences militaires et des personnels disponibles pour exécuter le travail de nettoyage du champ de bataille, en soulignant toutefois qu'il lui était impossible dans les circonstances du moment, d'accentuer ce travail, faute de plus de main-d'œuvre[769]. Comme dans l'armée française, la récupération britannique était bridée par le manque de main d'œuvre.

---

[765] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 – 411. IIe Section – Reconstitution du sol, des voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale, *op. cit.*

[766] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 411-7. Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies. IVe Section. Rapport présenté au Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies sur l'organisation d'un « Service spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi ». Non daté. Non signé.

[767] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Records of the Ammunition Supply Board. 1918-19. NM-91-1937, B2. Instruction for safeguarding and handling of ammunition in the field. Issued by Ordance Department. AEF. March – 1918.

[768] Général chef de la Mission militaire française attachée à l'Armée britannique.

[769] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Courrier du 23 février 1918 au général chef de la Mission militaire française attachée à l'Armée britannique.

Avant 1916, le GQM ne vit pas la nécessité de créer une organisation spéciale dédiée à la récupération des munitions et matériaux du champ de bataille. En effet, les personnels formant l'Artillerie, très disciplinés et entraînés, réalisaient *de facto* et à leur initiative, cette tâche dans l'exécution quotidienne en routine de leur mission de combat.

1.5. 1916-1918. LA CREATION DE SERVICES ET DE DETACHEMENTS SPECIAUX DE LA RECUPERATION

1.5.1 Création du *Salvage* britannique

En 1916, les pertes humaines occasionnées par la bataille de la Somme, l'intensification des combats, nécessitèrent de remplacer ces personnels par des troupes moins bien préparées qui ne pouvaient plus effectuer efficacement la récupération. Pour pouvoir poursuivre la mission de récupération, l'Etat-Major britannique créa alors une organisation spéciale, dénommée *Salvage* (Service de la récupération). Les missions assignées au *Salvage* étaient (i) la réception et la manutention des objets et épaves récupérées par les troupes combattantes, (ii) le ramassage des épaves dans les zones des Divisions et des Corps, ainsi qu'à la notification à l'autorité responsable du gaspillage pouvant être évité et (iii) le triage et l'expédition de tous les objets récupérés.

Les consignes étaient les suivantes. Le ramassage s'effectuait au moyen d'équipes de 6 à 10 hommes, sous le commandement de gradés, dotés chacun de deux musettes pour la collecte des cartouches, chargeurs et autres petits articles. Parallèlement, une équipe s'était spécialisée dans la collecte des douilles et autres munitions d'artillerie.

Selon le GQM les champs de bataille de 1916 renfermaient au moins 150 à 200 000 tonnes de matériel du Génie, comprenant du bois de construction et autres matériaux de construction d'abris et galerie de mines, auxquels s'ajoutaient les 10 à 15 000 tonnes de douilles en cuivre et de corps d'obus vides. Pour ce dernier, la remise en état de ce matériel « *économiserait non seulement le coût, mais encore le transport par mer, une grande proportion de transport et de manipulation qu'exigerait la même quantité de matériel neuf*[770] ».

1.5.2 1917. Intensification de la récupération

1917 marqua un tournant dans les modalités et l'organisation de la récupération et de la remise en état des sols pendant le conflit. La récupération devint un enjeu majeur pour la conduite de la guerre pour deux acteurs majeurs de la Grande Guerre. D'une part l'Allemagne, acculée par le blocus des Alliés, à la recherche de matières premières pour mener et poursuivre sa guerre industrielle, et les forces expéditionnaires des Etats-Unis, entrées en guerre en 1917 mais opérationnelles en 1918, loin de leurs bases et dépendants des approvisionnements locaux.

En 1917, pour les Français, la question de la remise en état des terres agricoles, suite à l'insuffisance des récoltes de 1916 et à l'intensification de la guerre, se posa avec plus d'acuité encore que les trois années de guerre qui précédèrent.

[770] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport sur la réorganisation du système de récupération de matériel des armées britanniques en France. Non signé. Non daté.

1.5.3 La récupération allemande. Entre vandalisme méthodique et pillage institutionnalisé en territoire occupé

Le talon d'Achille de l'Allemagne était, dans une guerre qui s'éternisa, l'approvisionnement en matières premières nécessaires pour alimenter la machinerie militaro-industrielle. Sur ce point, l'Allemagne était doublement fragilisée, d'abord par l'efficacité du blocus maritime imposé sur les océans par la marine britannique depuis 1915 « *les tentatives de l'Angleterre qui cherche à nous affamer, à tuer notre industrie*[771] ».

Ensuite, si le sous-sol allemand regorgeait de charbon et de lignite et donc pourvoyeur d'hydrocarbures benzéniques, il restait pauvre en métaux non ferreux, comme le cuivre, le zinc, l'étain, nécessaires (pour le bronze, le laiton) pour la fabrication des cartouches, fusées d'artillerie, etc. Les pénuries en étain entrainèrent l'abandon des chargements d'obus en acide picrique, faute de pouvoir protéger par étamage l'intrados de ces munitions. Les sulfures dont on tirait l'acide sulfurique pour produire des explosifs nitrés (par sulfonitration) faisaient aussi défaut. Faute de disposer de gisements primaires et d'avoir accès à ceux outremer (ses colonies en guerre, rapidement occupées par les Alliés, étaient elles-mêmes pauvres en ces matières), l'Allemagne chercha d'abord à optimiser l'usage des munitions, réclamant pour certaines armes « *la plus extrême économie de munitions*[772] » et à rationaliser sa consommation en matières premières, notamment à compter de 1917, et se tourna aussi en parallèle vers d'autres gisements, ceux des ressources secondaires. Elle organisa un Service de la récupération pour s'approvisionner depuis les territoires occupés, détachant sur le terrain des *Sammelbataillon* [773].. La question de la récupération devint vitale, cruciale pour l'Allemagne « *On utilise tout ce qui est encore susceptible de quelque service, on sauvera tout ce qu'il y a intérêt à sauver. Récupérer, c'est servir l'ensemble de la nation, c'est accomplir un devoir éminemment patriotique*[774] ».

Elle mena alors en réaction aux affaiblissements des approvisionnements en matières premières, une récupération à outrance, procédant par réquisition, instituant une forme de pillage systématique, en règle, des territoires occupés, qui fut méthodiquement appliquée lors du repli stratégique sur la ligne Hindenburg de mars 1917 *« Les intérêts des populations envahies et même ceux des neutres ne peuvent être mis en balance avec ceux de l'empire. Il faut ramasser tous les approvisionnements cachés et exploiter à l'extrême les pays envahis dans l'intérêt de l'industrie allemande. Tel est le but du ramassage*[775] ». Etaient aussi visés les lieux de culte (et en particulier les cloches sources de bronze qui furent décrochées des clochers), les œuvre d'art et les engins agricoles, les forêts « *Les noyers (pour les fusils), les frênes (pour les appareils d'aviation) devaient être abattu avant fin février* [776]».

Puis créèrent des ateliers de réfections (comme celui du groupement d'Aulnois, dans le département de l'Aisne) pour remettre en état puis en service canons et munitions récupérés et endommagés.

---

[771] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161. Résumé. Règlement sur le ramassage des objets à récupérer (IIIe Armée allemande). 24 février 1917. GQA, le 3 février 1918.

[772] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 939. Extrait du B.R. de l'armée britannique, du 14 juin 1917. Economie de munitions chez l'ennemi. Traduction d'un ordre secret de la IV^{e}Armée allemande, du 11 avril 1917. Signé. Sixt v. Armin.

[773] Littéralement « Bataillon de collecte »

[774] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161.Le service de récupération des matériels dans l'armée allemande (étude faite par la Ire Armée). GQG des Armées du Nord et du Nord-Est, le 27 juillet 1918. Traduction de la brochure allemande de 1917 intitulée « Die Sammeltätigkeit beim Feldheer ».

[775] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161. Résumé. Règlement sur le ramassage des objets à récupérer (IIIe Armée allemande). 24 février 1917. GQA, le 3 février 1918.

[776] *Ibid.*

Comme chez les Alliés, la récupération allemande fut stimulée par des primes incitatrices. Les troupes d'infanterie se devaient de récupérer les balles françaises, de ramasser les corps d'obus de 75 mm « *pour servir à la confection de projectiles de Minenwerfer auxiliaires* » et pour cela « *On donnera cinq pfennig par corps d'obus*[777] ».

Un seul récit de guerre a été identifié relatant spécifiquement les activités extra-combattantes de récupération. Il s'agit du témoignage du soldat allemand Werner Bertin, transcrit sous la plume de l'auteur Arnold Zweig et intitulé « *L'Education héroïque devant Verdun* » publié en 1935, retranscrivant le vécu du soldat à Verdun, à Douaumont en 1916. Arnold Zweig écrit « *Grâce au dégel, on a pu parvenir jusqu'aux corbeilles de munitions et aux obus qui remplissaient le fond d'une fosse et qui avaient dû servir aux canonniers comme palier d'affûts. Ce sera un sacré boulot de les sortir de leur gaine de boue et de les transporter jusqu'à la prochaine station de la voie ferrée. Mais le sergent Barkopp a promis que le lendemain serait jour de repos, parce que, d'ici à la nuit tombée, le dernier wagon sera plein, le convoi sera au complet et partira pendant la nuit. Les cinq hommes de l'escouade retirent les obus de la boue, les nettoient, grattent prudemment le terrain avec leurs pioches ; les culots sont glacés, gluants et lourds, et il ne faut pas avoir peur de s'abîmer les mains*[778] ».

Enfin, en Allemagne, des collectes furent organisées, pour le cuivre dans les écoles, pour les cheveux (pour la fabrication de courroies), pour les orties (pour le tissage des bandes molletières), de peaux de lapins, etc.

1.5.4 Organisation de la récupération chez les Français

1917. Mise en place de dispositifs d'Etat pour la remise en état des sols et articulation avec la récupération

- **Augmenter les matériels récupérés pour limiter les approvisionnements par les arrières**

Il s'agissait dans un premier temps pour l'Armée de récupérer tous les matériels et matériaux susceptibles d'être réutilisés pour limiter les approvisionnements par des fournitures neuves provenant des réserves de l'arrière (et soulager l'effort de production industrielle et la consommation des matières premières). Les débris de matériel militaire, les épaves et déchets de toute sortes provenant des armées et abandonnées provisoirement sur le champ de bataille ou dans la zone des armées était propriété d'Etat « *[…] il s'agit en l'espèce de matériel de guerre sur lequel la propriété de l'Etat ne paraît faire aucun doute*[779] ».

« *Le matériel à récupérer comprend tous les objets ou débris importés sur ou dans les immeubles et le sous-sol par le fait de la guerre*[780] ». Les instructions en vigueur indiquaient que la récupération était d'une prime importance « *pour les besoins de la défense nationale*[781] ». Les officiers ne devaient jamais refuser leur concours aux unités chargées des travaux de récupération.

---

[777] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 939. Ordre du VIIIe C.R-II & 18 mai-8 juin ; 50e Division, 30 juin ; 50e Ble. Art-12/10) Etat Major Général. 2e Bureau. Au GQG, le 28 novembre 19015. Annexe au bulletin de renseignement du 28 novembre. Mesures d'économie prises par l'administration militaire allemande.

[778] Zweig, A. (1935). *L'Education héroïque devant Verdun.* Traduit de l'allemand par Blaise Briod. Distribué par le Cercle du Bibliophile. Librairie Plon, Paris. 1972. p. 348.

[779] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 82. Ministère de la Guerre, contrôle de l'Administration de l'Armée. 1er Région. Enquête sur les marchés de récupération et de désobusage. Rapport Particulier. Fait par M. Rebouet. Contrôleur de 1er Classe. 29 npvembre 1928. Signé : Rebouet.

[780] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Instructions sur la récupération du 3 mai 1918. Signé : Georges Clemenceau.

[781] *Ibid.*

Ils étaient par ailleurs fortement incités à susciter des initiatives individuelles en expliquant aux hommes l'utilité qu'il y avait « *à ne pas détruire ou gaspiller le matériel et les approvisionnements susceptibles d'être encore utilisés aux armées, soit à l'intérieur*[782] ».

Des primes incitatrices (« *destinées à augmenter le rendement de la récupération et à stimuler le zèle de chacun*[783] ») étaient versées aux personnels militaires et aux civils participant à la récupération selon un barème établi au regard de la nature des matériels ramassés. La récupération était réglementée par des notes et circulaires du Général en Chef (Foch). Les textes concernant cette question étaient nombreux et contenaient des prescriptions extrêmement détaillées n'intéressant que certains services, traitant de la récupération *sensu stricto* et de l'évacuation des matériaux et matériels sur l'arrière. Par ailleurs, les acteurs de la récupération étaient nombreux et non coordonnés : unités du Génie, de l'Artillerie et de l'Intendance. Les instructions du 3 mai 1918[784] étaient en ce sens particulièrement démonstratrices de ce désordre car elles abrogèrent toutes les notes relatives à la récupération des années 1914 et 1915, huit notes datant de 1916 ainsi que sept notes de 1917. La récupération s'opérait sur le front, dans les zones des armées comme à l'arrière, dans les terrains militaires d'instruction. Les obus tirés et non éclatés étaient exclus du ramassage et de la tarification (pour ne pas inciter des personnels non compétents à manipuler des engins de guerre potentiellement encore en puissance d'explosion).

- **Un personnel militaire expérimenté et aguerri aux dangers des REG**

En 1917, les engins non éclatés présents sur et aux abords des champs de bataille faisaient partie de l'environnement habituel des combattants qui en connaissaient les dangers et savaient se comporter en connaissance de cause à leur contact. Les soldats évitèrent ainsi si possible de remuer les sols où la présence de ces engins était pressentie et à défaut ils « *prennent d'eux-mêmes les précautions que leur suggère une perspicacité et un sang-froid développé par une longue expérience*[785] ».

Le 13 avril 1917 (soit une semaine avant le déclenchement de l'offensive Nivelle sur le Chemin des Dames), le Ministre de la Guerre fut consulté par le Ministre de l'Intérieur (Service Spécial pour la Reconstitution des Régions envahies) sur « *l'expérience acquise par les troupes en campagne au sujet des explosions d'engins non éclatés enfouis dans les sols et sur les mesures de précaution qu'il y aurait lieu de prescrire à la population*[786] ». Le Ministre de la Guerre précisa en réponse à cette requête que seul un très petit nombre d'explosions accidentelles liées à des engins non éclatés enfouis étaient à déplorer au sein des armées en campagne. Cette situation aurait été liée à l'expérience des soldats et de leur encadrement concernant la localisation des « *endroits où l'on suppose qu'il soit tombé un grand nombre de projectiles* [787]» et en ce qui concerne les dépôts de grenades « *les hommes ont un certain instinct de leurs emplacements probables et se tiennent sur leur garde quand ils constatent certains indices* [788]».

---

[782] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Instructions sur la récupération du 3 mai 1918. Signé : Georges Clemenceau.

[783] *Ibid.*

[784] *Ibid.*

[785] *Ibid.*

[786] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4-411. Le Ministre de la Guerre à Monsieur le Ministre de l'Intérieur (Service Spécial pour la Reconstitution des Régions envahies). 22 avril 1917.

[787] *Ibid.*

[788] *Ibid.*

- **Une récupération entrainée dans le sillage de l'accentuation des efforts étatiques de remise en état des sols**

En 1917, le gouvernement français créa *in fine* des services spéciaux destinés à la remise en état des sols. Début 1917, l'initiative fut prise par l'Etat d'intervenir directement dans l'exploitation des terres à des fins agricoles « *Le Gouvernement a, par suite, estimé que l'Etat devait généraliser l'effort et réaliser directement le travail auquel ne pouvait plus suffire la bonne volonté des exploitants*[789] ». Pour accélérer et faciliter la reconquête des terres agricoles, l'interventionnisme étatique se traduisit aussi par une mécanisation du travail de la terre. Le Service de la Motoculture, fut mis en place conformément à la loi du 7 avril 1917 sur la remise en état des sols (loi relative à la mise en culture des terres abandonnées), visant à restaurer des sols agricoles exploitables par le labour mécanisé, travaux qui était totalement dépendant de l'avancement des travaux de déblaiement des tranchées et abris et du désobusage.

Les armées et l'Etat s'organisèrent aussi pour répondre aux enjeux de la reconquête des usages agricoles des sols des anciens champs de bataille, en étendant encore plus, notamment au domaine agricole, l'interventionnisme d'état et en accélérant les opérations de récupération et de destruction de munitions. La nécessité de la récupération des REG était consubstantielle à celle de la reconquête des terres agricoles, dont l'intensification entraînait celle de la récupération, la récupération étant un prérequis incontournable aux travaux de remise en état des sols. La récupération était pour les Français à ce titre une opération nécessaire et d'une extrême importance.

Raymond Poincaré, Président de la République Française, signa le 18 août 1917 un décret visant, à l'initiative du Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des région envahies et au terme de conférences destinées à accélérer et accroître l'efficacité de la récupération, la création d'un service spécial, rattaché au Ministère de la Guerre[790], chargé de la remise en état du sol « *des régions reconquises sur l'ennemi* ». Ce Service spécial « interministériel » comprenait des officiers du Génie et de l'Artillerie, de fonctionnaires ou agents du Ministère des Travaux Publics, du Ministère de l'Intérieur et du Ministère de l'Agriculture[791]. Dès lors, les opérations de récupération et de débarrassage des REG encombrant les anciens champs de bataille s'inscrivirent explicitement dans la dynamique étatique civile et militaire conjointe de remise en état des sols à des fins agricoles.

Le Service spécial fut en premier lieu chargé de mener les études et les travaux nécessaires à l'enlèvement des projectiles et engins explosifs de toute nature, tant en surface qu'en profondeur (« *de labour au moins* ») qui « *auraient échappé aux investigations des corvées de nettoiement du champ de bataille* »[792]. Le Service spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi se substitua progressivement aux personnels des armées et fut placé sous l'autorité du Ministère de la Guerre lorsque les opérations de remise en état du sol avaient un caractère purement militaire (recherche et destruction des projectiles non explosés, comblements de mines et galeries souterraines, etc.). Le Service spécial fut rattaché au Ministère de l'Agriculture dès que la tâche à connotation militaire avait été exécutée (« *démolition des travaux défensifs (abris souterrains, tranchées bétonnées, etc.)* ».

---

[789] Bibliothèque nationale de France. *Bulletin annoté des lois et décrets*. 1er janvier 1917.

[790] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 411-0R. Poincaré. Président de la République française Décret du 18 août 1917. Comité Interministériel pour aider à la reconstitution des régions envahies. Rapport sur l'organisation d'un « Service Spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi » du 27 juin 1917, et ses annexes.

[791] *Ibid.*

[792] Diligentées par les équipes de récupération.

Comme en 1914, le GQG avait parfaitement conscience de l'ampleur de la tâche et que ces opérations allaient s'inscrire dans la durée, avec des résultats dont les effets allaient se mesurer de façon différée sur les moyens et longs termes « *l'effort énorme qui devra être déployé pour effacer du sol la trace de son occupation par les armées, n'aura pas pour contrepartie un gain immédiat : le résultat obtenu servira seulement de prélude à une remise en valeur, probablement fort lente, du sol national. Il sera seulement la réparation d'une partie des dégâts de la guerre*[793] ».

Fin 1917, six ministères œuvrèrent pour la reconstruction : outre le Ministère de l'Intérieur, les ministères mobilisés étaient ceux des Travaux publics (reconstruction des immeubles), de l'Agriculture (via l'Office de Reconstitution Agricole, ORA), du Commerce et l'Industrie (via l'Office de Reconstitution Industrielle, ORI), de la Guerre (remise en état du sol) et des Affaires étrangères (sauvegarde des intérêts privés en pays ennemis ou occupés par l'ennemi)[794]. Pour une plus grande efficacité, un regroupement au sein d'une administration spécifique devint indispensable. Ce fut dans le gouvernement Clemenceau que vit alors le jour un ministère afin d'assurer la transition entre l'organisation administrative du temps de guerre et celle du temps de paix, de coordonner les actions des différents acteurs, ministères civils comme militaires, vers un but commun unique et partagé, celui de la reconstruction. Un département ministériel unique fut ainsi créé le 16 novembre 1917 qui prit le nom de « Ministère du Blocus et des Régions libérées ». Ses missions, parmi lesquelles la récupération et la destruction des REG, furent énoncées dans le décret du 13 décembre 1917 :

- Réorganiser la vie locale en assurant le ravitaillement, le retour des services publics, la distribution des secours et la réinstallation des populations ;
- Aider les sinistrés pour le relèvement des immeubles détruits, en rationalisant les nouvelles constructions (plans d'alignement et de nivellement) et en assurant l'approvisionnement en matériaux, la recherche de main d'œuvre et les moyens de transports ;
- Réparer les dommages de guerre par la constatation, l'évaluation, et la mise en place des régimes d'indemnisation ;
- Reconstituer le sol par la remise en état des terres et la destruction des munitions non explosées ;
- Favoriser la reprise de l'activité agricole commerciale et industrielle par les achats de matériels, de matières premières, de bétail, d'engrais, de semences et leur cession aux sinistrés.

[793] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. 4e Direction – Génie. 1er Annexe au Rapport du 27 juin 1917. Comité Interministériel pour aider à la reconstitution des régions envahies. 2e Section – Reconstitution du sol, voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale. Note au sujet des conditions dans lesquelles pourrait être exécutées la démolition des travaux défensifs – (abris souterrains, tranchées bétonnées, etc.). Paris, le 26 octobre 1916.

[794]France Archives. France. Ministère des Régions libérées (1917-1925) https://francearchives.gouv.fr/fr/authorityrecord/FRAN_NP_052995

1918. Réorganisation, optimisation du fonctionnement de la récupération avec la reprise de la guerre de mouvement et la perspective d'une cessation des hostilités

- **Les nouvelles instructions du 3 mai 1918**

Une conférence interministérielle fut à nouveau initiée en janvier 1918 et se réunit pour « *mettre au point, en ce qui concerne le Département de la Guerre, la question de la récupération des déchets dans la zone des armées*[795] » et en particulier (i) coordonner les résultats des travaux déjà entrepris isolément par les différents acteurs de la récupération, (ii) prévoir dans la réglementation la collecte des épaves des services de santé et de l'aéronautique, jusqu'alors négligée, (iii) réviser la nomenclature des matériels à récupérer et fournir un avis sur l'opportunité d'étendre le système des primes aux divers services intéressés. Les règles de versement des primes étaient complexes et avaient souvent pour effet de retarder leur paiement aux intéressés. La mission de cette conférence était donc de préparer un texte unique destiné aux détachements de récupération et devant être porté à la connaissance de toutes les unités en élaguant les prescriptions de détail et les règles concernant les évacuations sur l'intérieur. La conférence interministérielle déboucha sur les instructions du 3 mai 1918 signées Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre, Georges Clemenceau[796].

Dans chaque armée, un plan de récupération fut établi par les soins du Général Commandant l'Armée, ayant pour but d'organiser un ramassage méthodique.

Les munitions tirées et non explosées étaient exclues des plans de ramassage et il était formellement interdit de les manipuler et de les déplacer sur des centres de récupération. La gestion de ces engins rentrait dans les prérogatives de l'Artillerie que les personnels de la récupération devaient informer en cas de découverte de projectiles. Les engins non tirés, explosifs ou spéciaux, les douilles, caisses à munitions, à gargousses, à grenades, etc. étaient récupérées puis versés aux Parcs d'Artillerie réglés par des instructions spéciales.

Dans les secteurs très actifs, marqués par des bombardements violents, les travaux de récupération, suspendus durant les épisodes paroxystiques, étaient repris « *dès que la crise est passée* » de façon à éviter « *des amoncellements trop considérables dans les lignes*[797] ».

Chaque secteur de division était pourvu d'un détachement de récupération d'une soixantaine d'hommes, pouvant être renforcé en cas de besoins. Ces détachements opéraient par des corvées régulières de recherche et de ramassage. Mais « *En raison de sa dispersion, une proportion notable du matériel à récupérer échappe aux recherches du personnel des corvées régulières*[798] », le Ministère de la Guerre chercha à stimuler par des primes la coopération des civils et habitants et les initiatives individuelles. Ces primes devaient être étendues aux personnels des Armées d'Orient et des troupes françaises en Italie (après accord avec le haut commandement italien).

[795] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Ministère de la Guerre. Instruction sur la récupération du matériel militaire et des épaves dans les armées. Présidence du Conseil ; Sous-Secrétariat d'Etat ; Office interministériel du 7 mars 1918. Signé : le Lieutenant-Colonel, Président de la conférence, Wildermuth. La conférence interministérielle déboucha sur les Instructions du 3 mai 1918 signées Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre, Georges Clemenceau.

[796] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Instructions sur la récupération du 3 mai 1918. Signé : Georges Clemenceau.

[797] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Instructions sur la récupération du 3 mai 1918, *op. cit.*

[798] *Ibid.*

Parallèlement et indépendamment à la récupération, fonctionnait aux armées un service dépendant du Ministère de l'Armement dénommé « Service des réquisitions et des évacuations de matériaux métallurgiques » destiné soit à réquisitionner soit à évacuer les matériaux et matériels existant dans les usines et localités démolies ou exposées au feu des Allemands.

- **Une récupération ajustée à la reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918**

Puis avec la contre-offensive et la poussée alliée amorcée dès juillet 1918, et la perspective d'une possible cessation des hostilités dans les mois qui suivirent, la situation militaire sur le terrain changea fondamentalement, ce qui provoqua nécessairement une réorganisation de la récupération. La ligne de front progressa rapidement vers le nord-est et avec elle la position et l'étendue des arrières. L'ancienne ligne de front stabilisée, théâtre de la guerre des tranchées, là où précisément s'étaient accumulées quantités de munitions, tirées ou non tirées, fut délaissée dès juillet 1918 par l'avance rapide des troupes combattantes des Corps d'Armée (CA) alliés lors de leur contre-offensive généralisée.

Le GQG mobilisa et projeta ses forces et ses moyens de transport vers l'avant, pour espérer en finir avec la guerre. Les artilleurs et militaires qui débarrassaient jusqu'alors le champ de bataille des objets dangereux ou valorisables quittèrent les systèmes de tranchées, le *no man's land* et ses terrains constellés de munitions, laissés alors à l'abandon, libres d'accès aux populations qui regagnaient leurs terrains et ce qui restait de leurs maisons. Les territoires de Champagne et de Picardie à nouveau intensément pilonnés lors des offensives allemandes du printemps 1918 furent aussi progressivement libérés.

Un jeu de notes et d'instructions émanant du GQG visait notamment à améliorer la récupération dans les circonstances de l'avancée alliée « *en profitant de l'expérience acquise*[799] ». La note n° 8. 969 / D.A. du 25 octobre 1918 sur la récupération des munitions françaises réaffecta les tâches de la récupération selon la physionomie du front et de ses arrières.

Elle s'effectua par (i) les artilleurs au niveau des batteries et par (ii) les Parcs des CA sur les positions qui n'avaient pu être vidées par les personnels des batteries, notamment sur les emplacements qui servirent de centres de livraison ou de dépôts de transit, (iii) les armées se chargèrent de ces opérations, plus à l'arrière sur les zones des armées « *la limite avant de cette zone étant fixée au fur et à mesure de la progression*[800] ».

Les opérations de récupération au niveau des batteries devaient être réduites au stricte minimum, les artilleurs devaient épuiser les réserves avant d'envisager la récupération « *Il y a lieu d'observer qu'elles [ndlr : les opérations de récupération] seront réduites au minimum si le Commandement sut renoncer à la constitution auprès des batteries, de stocks trop considérables que la forme actuelle de la guerre ne justifie d'ailleurs plus* » […] « *Le Parc doit utiliser tout d'abord ces munitions pour le ravitaillement des batteries, avant de faire appel aux ressources de l'arrière* [801]». Les anciennes réserves de munitions signalées par les artilleurs devaient être prioritairement dirigées vers les batteries qui en exprimèrent le besoin, avant de faire appel aux ressources de l'arrière.

Les munitions en excédant furent rassemblées dans un nombre le plus restreint possible de points d'entreposage (points de rassemblement) pour faciliter leur prise en main ultérieure et leur évacuation par l'Armée.

---

[799] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Grand Quartier Général, Etat-Major. Inspection Générale de l'Artillerie & Direction de l'Arrière. Note n° 8. 696 / D.A. *op. cit.*

[800] *Ibid.*

[801] *Ibid.*

Les CA étaient alors déchargés de leurs tâches de récupération « *leur avance ne leur permettant ni d'utiliser pour leurs ravitaillements des munitions hors de portée, ni de laisser en arrière des éléments de main d'œuvre et de transport indispensable à l'avant* » Ainsi *« la récupération incombe dès lors à l'Armée*[802] ». En d'autres termes, la reprise de la guerre de mouvement imposa une réaffectation des tâches de la récupération des unités combattantes vers, lorsque les opérations militaires le permettaient, des personnels militaires non combattants. Pour ces forces combattantes, leur projection vers l'avant pour tirer les bénéfices tactiques des succès alliés de la contre-offensive de l'été 1918 était prioritaire.

- **Organisation et tâches de la récupération militaire**

Les anciennes zones de combat balayées par le front furent découpées en secteurs «de récupération » d'étendues telles qu'ils pouvaient être raisonnablement explorés et nettoyés par un détachement. Ce découpage concerna les territoires, en secteurs français, repris aux Allemands à la faveur de la grande contre-offensive alliée de l'été 1918, à savoir l'Aisne, l'Oise, la Somme et le Pas-de-Calais. 33 secteurs furent ainsi identifiés[803].

Les munitions en bon état, transportables et récupérées étaient acheminées vers des centres de triage avancés faciles à desservir par camion et à proximité d'une gare de chemin de fer à voie normale au sein desquels l'armée procéda au classement des munitions en trois catégories (i) utilisables en l'état, (ii) douteuses, et (iii) à réfectionner, les projectiles jugés intransportables étant détruits au plus près de leurs lieux de découverte. Les munitions utilisables étaient dirigées vers des dépôts de l'armée ou des centres de livraison, les douteuses vers le centre de triage principal de l'armée, et les engins à réfectionner sur le Centre de réfection du Groupe d'Armées (GA). Les munitions ex-allemandes récupérées par les Français furent aussi gérées de la sorte, mais mises à part dans les centres de triage avancés puis évacuées sur des Centres de rassemblement des GA spécifiques aux munitions allemandes.

Trois à quatre centres de triage avancés s'avérèrent nécessaires par Région militaire, chacune d'elles étant dotée d'un centre principal, placé sous l'autorité d'un officier supérieur de l'Artillerie spécialement chargé de la récupération des munitions, rattaché au 4e bureau de l'Etat-Major des Armées. Les GA organisèrent un ou plusieurs centres de rassemblement de munitions allemandes[804].

Un ou deux centres de réfection des munitions françaises, desservis par des voies ferrées normales, furent aussi installés dans chaque GA, rattaché administrativement au Parc d'Artillerie le plus proche; placé sous la direction d'officiers issus de l'artillerie. Ces centres étaient pourvus d'un effectif issu de l'Artillerie, de l'Infanterie (travailleurs territoriaux) et de moyens de transport pour la desserte intérieure des établissements. Un centre de réfection pour le GA du Centre fut installé à l'arsenal de Mourmelon-le-Petit (département de la Marne) pour les engins provenant des IVe et Ve Armées et quatre centres de rassemblement de munitions ex-allemandes dont ceux de Morains-Aulnay (ancienne commune du département de la Marne, actuel Morains-le-Petit) et de Confremeaux (dans le département de l'Aisne)[805].

---

[802] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Grand Quartier Général, Etat-Major. Inspection Générale de l'Artillerie & Direction de l'Arrière. Note n° 8. 696 / D.A. *op. cit*.

[803] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 411-7. Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies. IVe Section. Rapport présenté au Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies sur l'organisation d'un « Service spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi ». Non daté.

[804] A Spincourt, l'entreprise Clere & Schwander récupéra un centre de rassemblement spécial, dédié aux munitions chimiques, devenu de taille aberrante, et unique pour éviter d'avoir à démultiplier les dépôts et donc les dangers incombants à ces engins.

[805] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG, le Général de Division Maistre, Commandant le Groupe d'Armées du Centre à Monsieur le Général Commandant en Chef du 30 octobre 1918. Signé illisible.

Ces opérations de rassemblements se poursuivirent dans la période qui suivit la cessation des hostilités. Pour les engins à réfectionner provenant des IIe, VIIe et VIIIe Armées (GA de l'Est). ils furent dirigées vers le centre de réfection de Merrey (département de la Haute-Marne)[806].

- **Une récupération toujours à la peine faute de personnels**

La récupération fut dotée de moyens matériels (camions, chariots de parcs) et humains (chauffeurs, « Unités de travailleurs[807] » à disposition des armées, de petits personnels d'artillerie, artificiers, canonniers, sous-officiers, etc.) spécifiquement alloués à cette tâche. Mais comme durant les années de guerre qui précédaient, la récupération en 1918 pâtit d'un manque de personnel et de main d'œuvre. Les moyens de la récupération restaient sous-dimensionnés, disproportionnés au regard des quantités de projectiles et matériels délaissés à ramasser et à gérer. Le Général Fayolle écrivit à ce sujet le 28 août 1918 « *Le travail à faire est très considérable et la main-d'œuvre dont nous disposons tout à fait insuffisante pour le mener à bien rapidement, même pour les munitions qui sont trouvées groupées déjà en approvisionnements constitués. Encore moins peut-il être question de procéder à un nettoyage méthodique portant sur les munitions isolées qui peuvent se trouver éparses sur le terrain reconquis* [808] ».

1.5.5 Finalité militaire de la récupération française en 1918

En octobre 1918, l'Allemagne fit savoir aux Alliés son désir de mettre fin aux combats. La récupération apparaît donc, dans la dynamique de la guerre de mouvement de 1918 puis dans la perspective d'une cessation prochaine des hostilités comme une variable d'ajustement des approvisionnements de l'Artillerie pour garantir, sur un front mouvant, la constance d'une puissance de feu décisive tout en cherchant à limiter autant que faire se peut l'approvisionnement par du matériel nouveau depuis les arrières. La récupération permettait aussi de raccourcir considérablement les délais d'approvisionnement des batteries en mouvement. Les opérations de récupération avaient donc à l'automne 1918 une finalité entièrement militaire dans le contexte de la contre-offensive alliée et la guerre de mouvement. La refonte de la récupération en 1918 marqua d'une pierre angulaire la naissance d'une structure d'abord embryonnaire, qui allait ensuite devenir à la fin des hostilités le « Service spécial du désobusage ».

[806] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général de Division De Castelnau, Commandant le Groupe d'Armée de l'Est à Monsieur le Général IGA. QG le 29 octobre 1918.

[807] Prisonniers de Guerre et/ou travailleurs indochinois.

[808] Archives départementales de l'Oise, site de Beauvais, cote KZ 1540. Comité départemental pour l'examen des questions relatives à la reconstitution des régions libérées, séance du 9 novembre 1918, rapport du préfet de l'Oise.

1.5.6 Le *Salvage* et l'organisation de la récupération chez les Britanniques

« Ce travail s'opère surtout dans les zones de l'avant et se fait au jour le jour, sans s'intéresser aux opérations militaires. Il est devenu un élément de la routine journalière de la guerre moderne[809] »

Côté britannique, une conférence fut organisée par le GQM le 19 juin 1917 pour mieux structurer et optimiser la récupération. La récupération n'était efficace que dans les zones situées en arrière de percées importantes de l'Armée britannique, rendant définitivement caduques et inutiles les ouvrages défensifs et cantonnements qui s'y trouvaient[810]).Les opérations de récupération de l'Armée britannique débutèrent sur le champ de bataille de la Somme, à l'ouest de la route Arras-Bapaume-Péronne (sur une zone de 1 800 km^2 subdivisée en secteurs, sous la direction d'un officier faisant fonction de *Salvage Officer* de Zone.

Figure 127 : Ecriteau à l'entrée d'un dépôt de récupération britannique « Il est pour le « Fritz ». Il a été fait pour lui. Alors pourquoi le laisser reposer dans la boue, prends-le et amènes le au dépôt de récupération » Langemark (Langemark-Poelkapelle). 8 octobre 1917 [811].

L'objectif prioritaire était comme celui des Français, depuis 1914, de rendre les superficies nettoyées « *prêtes pour la culture et on espère que cette étendue sera considérablement augmentée avant les semailles d'automne*[812] ». L'effectif à la disposition du contrôleur de *Salvage* s'élevait en 1917 à quelque 11 000 hommes dont 8 000 « *sont des noirs* [813] ».

Les Britanniques s'affairèrent au nettoyage des sols de France. Tout comme pour le *Salvage* américain déployé en Meuse (1er Armée) comme aux confits de l'Aisne et de la Champagne (2e Armée), il est vraisemblable que des consignes aient été passées par le GQG, au titre du commandement unique, pour faire en sorte que (i) les méthodes, moyens de la récupération alliée soient cohérents avec celles et ceux en vigueur dans l'armée française et que (ii) les sols agricoles des secteurs sous contrôle alliés ne soient pas écartés des opérations de récupération et de remise en état des sols. Certaines notes et consignes US étaient des traductions littérales d'instructions émises à l'intention des troupes françaises.

[809] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport sur la réorganisation du système de récupération de matériel des armées britanniques en France. Non signé. Non daté.

[810] *Ibid.*

[811] Imperial War Museum, number Q 3013.

[812] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport sur la réorganisation du système de récupération de matériel des armées britanniques en France, *op. cit.*

[813] Ibid. L'armée britannique ne comportait aucun soldat d'appartenance noire-africaine ou afro-américaine. Cette référence à la couleur de peau est certainement en lien avec la présence au sein d'unités britanniques de troupes indo-pakistanaises ou népalaises.

1.5.7 1918. Motivations, missions, organisation et fonctionnement du *Salvage* américain

Création du Salvage (juin 1918)

Le Service de la Récupération de l'AEF (le *Salvage*) fut créé en juin 1918 dès l'engagement pleinement opérationnel des troupes américaines sur le sol français. Dans le secteur américain occupé par la Ier Armée du Corps expéditionnaire, en Meuse, le début du retour des populations civiles sur et aux abords des anciens champs de bataille fut ici comme ailleurs accompagné d'accidents, liés aux engins de guerre abandonnés sur les terres.

Les officiers américains se rendirent d'abord en toute logique là où un retour d'expérience sur ce genre d'opérations avait été acquis durant la guerre, en secteur britannique. Ils constatèrent lors de leur visite que « *des milliers d'hommes récupèrent les munitions sur l'un des champs de bataille et il a été dit que des munitions récupérées d'une valeur de plusieurs millions de dollars ont été remises en condition de réutilisation et que des tonnes de duds*[814] *et du matériel hautement dangereux étaient détruits*[815] ». En juin 1918, des soldats de la 78e Division traversèrent l'Atlantique pour constituer le *Salvage* sur le sol français. L'Etat-Major américain prit bien conscience de l'urgence que « *the salvage of ammunition cannot be delayed*[816] ».

Missions assignées

En juillet 1918, le *Salvage* fut organisé en trois sections aux missions bien différenciées (i) la récupération des matériels sur le terrain par les armées, intégrant la mission de rassemblement et d'expédition vers l'arrière des matériels réutilisables ou pouvant être réparés et a contrario, leur destruction sur place lorsqu'ils étaient définitivement endommagés, (ii) la récupération au sein des magasins de matériels avancés, et (iii) la réparation du matériel à l'arrière[817]. Les archives conservées à Washington D.C. montrent que les troupes devaient procéder sur le terrain avec ordre, discernement en respectant des priorités d'action. On voit sur ces archives que les motivations du *Salvage* américain n'étaient pas celles du Service de la Récupération français, de permettre la reconstruction des sols de France, mais la priorité avait été donnée à la suffisance des approvisionnements de l'AEF, loin de ses bases, des Etats-Unis, séparé du théâtre des opérations ouest européen par l'Atlantique où sévissait la guerre sous-marine à outrance menée par les Allemands.

L'organisation du *Salvage* fut orchestrée par une série de notes conservées aux archives nationales à Washington. Il s'agit notamment de « *Instruction for Salvage Squads working on artillery ammunition*[818] » et des « *Salvage Squads Instruction*[819] ». Les notes d'instructions étaient très précises et indiquaient, éléments de munitions par éléments, leur devenir : destruction, évacuation pour réparation et remise en dépôt.

---

[814] Anglais, littéralement « les ratés », engins tirés et non explosés, ou « *Unexploded Ordnance* » (UXO).

[815] National Archives. Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1-71.1 AEF. Memorandum for General Wheeler. Salvage of ammunition in the Army area. June 19, 1918.

[816] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Records of the Ammunition Supply Board. 1918-19. NM-91-1937, B2. Instruction for safeguarding and handling of ammunition in the field. Issued by Ordance Department. AEF. March – 1918. « Parce que les distances entre les sources d'approvisionnement sont plus grandes, et des difficultés de transport ».

[817] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1-71.1 AEF. Ammunition supply section. Memorandum for General Rice. July 24, 1918.

[818] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Instruction for Salvage Squads working on artillery ammunition.

[819] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Salvage Squads Instruction.

Comme chez le Service de la récupération des Français, les opérations étaient engagées au terme des offensives pour lesquelles des gains territoriaux significatifs avaient été effectués « *After an offensive has begun and substantial progress has been made, at least 400 men for each division in the line should start salvaging*[820] ».

Détruire les munitions dangereuses

Il était expressément demandé aux soldats, en cas de découverte fortuite d'engins, de les signaler à l'officier divisionnaire en charge des munitions qui allait alors positionner l'endroit sur une carte et se rendre sur les lieux pour inspecter les projectiles, pour lesquels il ordonnait la destruction, s'il les jugeait dangereux ou inutilisables**,** en suivant des méthodes de la note «*Unexploded Shell, Bombs, and Grenades – Methods of Destruction*[821] ».

Toutes les munitions endommagées ou qui avaient perdu leur ceinture de guidage étaient systématiquement détruites. Les troupes américaines devaient éliminer tous les engins ou éléments de munitions qui n'étaient plus dans leur conditionnement initial à l'exception des armes portatives et des munitions encore encartouchées.

Etaient aussi visés par les destructions les obus chimiques fuyards, ceux ayant perdu leur joint d'étanchéité, et des charges propulsives montrant des signes de dégradation (exsudation, dégagement de vapeurs à l'odeur nitrée, etc.). Ces charges étaient brûlées sur place. Ensuite, ce furent tous les engins tirés et non éclatés puis les fusées isolées qui étaient à détruire.

Le général directeur de l'Artillerie française incita les Américains, en décembre 1918, à ne plus récupérer les poudres pour être réemployées, compte tenu de l'arrêt des combats, mais à les détruire.

Récupérer tout ce qui était récupérable

Si la munition pouvait être sans aucun doute transportée, réutilisée ou réparée, l'officier divisionnaire faisait procéder à son évacuation. Etaient considérés comme réutilisables les engins qui n'avaient pas été déconditionnés et ceux, lorsqu'ils n'étaient pas endommagés, formant un coup complet (le projectile avec sa charge propulsive). Les matériels et engins transportables découverts sur les champs de bataille étaient dirigés vers des dépôts de rassemblement, des positions avancées et intermédiaires (*Advanced Ammunition Salvage Dump*). Ils étaient installés au centre des zones où le plus grand nombre de munitions devait être récupéré dès septembre 1918.

Plusieurs équipes mobiles, comprenant chacune de 15 à 20 hommes du Département des munitions étaient envoyées dans les dépôts de rassemblement afin de trier et d'allotir les engins selon leurs types et dans des dispositions assurant la sécurité. Comme pour l'Armée française, une priorisation des récupérations et des destructions fut assignée au *Salvage.*

Sur le terrain, le *Salvage* chercha aussi à récupérer tout ce qui traînait et qui présentait une certaine valeur : les vêtements, les chaussures, les équipements et armes… les chevaux et les mules morts. Les caisses de munitions en étain étaient écrasées, aplaties, pour être chargées. Les vêtements des soldats gazés étaient stockés isolément pour un traitement de neutralisation par les unités des blanchisseries.

---

[820] National Archives Washington D.C., number RG-120 NM-91, Box n°1653. Headquarter First Army AEF, sept 23th, 1918.

[821] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Unexploded Shell, Bombs, and Grenades – Methods of Destruction.

Un retour d'expérience encourageant

Les Américains tirèrent leurs premières leçons et retour d'expérience de leurs opérations de récupération, des résultats qui justifièrent pleinement leur poursuite. En effet, ils constatèrent que sur le territoire où stationnait la IIe Armée (Marne, Aisne) 98% des obus de 155 mm, 95% de ceux de 75 mm, 95% des munitions d'armes portatives, 95% des fusées, 95% des charges propulsives et 100% des grenades récupérés dans leur conditionnement initial pouvaient être réexpédiés directement au front depuis les dépôts avancés[822].

Rassemblement et réfection des munitions réutilisables

Les munitions des dépôts de rassemblement des positions avancées et intermédiaires étaient destinées à être réfectionnées ou à être expédiées à l'arrière pour stockage vers d'importants dépôts localisés le long des principales voies de communication de l'armée des États-Unis, dans les anciens centres de la logistique. Ces grands dépôts de munitions étaient les AOBD (*American Ordnance Base Dump*). Nombre d'entre eux furent installés dans le centre de la France (en particulier dans le Cher, le Loir-et-Cher), sur la méridienne entre les ports de l'Atlantique (Saint-Nazaire, Bordeaux, etc.) et le Grand Quartier Général américain de Chaumont (et terrain d'expérimentation et d'exercice à l'arme chimique de *Hanlon Field*) dans le département de la Haute-Marne. Les Américains, dans leur souci de suffisance en munitions ne firent pas que récupérer les engins directement utilisables mais recueillirent aussi les projectiles endommagés qui seraient encore fonctionnels après une étape de remise en état (réfection ou « *retro-fitting* »). La réfection de ces engins consistait à vider les cartouches et douilles de leurs charges propulsives et de reconstituer des charges réutilisables pour des projectiles de calibre 8 pouces[823] et plus. Les charges et les obus utilisables étaient réassemblés pour constituer des coups complets. Enfin, on procéda dans ces centres au retrait des fusées de culot des projectiles lourds de mortier de 12 pouces (300 mm) et d'obusiers *Howitzer* de 16 pouces (400 mm). Une partie de ce travail était réalisée par l'Armée française, dans des installations françaises. Mais les Américains dans un désir d'autonomie, voulant conserver la mainmise sur certaines opérations de réfection, créèrent dès 1917 une usine de déchargement et de rechargement de munitions dans un des AOBD, à Mehun-sur-Yèvre (département du Cher), et fonctionnant selon des méthodes et procédés britanniques. De grandes quantités d'eau (1 200 m^3) étaient nécessaires pour faire fonctionner l'installation[824]. Les procédés mis en œuvre par l'AEF pour décharger les explosifs des engins et pour les recharger ne sont pas explicités dans les archives consultées. Mais les importants besoins en eaux et l'approvisionnement en charbon, laissent présager qu'auraient été mis en œuvre des procédés similaires à ceux qui seront utilisés plus tard dans d'autres usines, celles destinées cette fois-ci au déchargement des engins pour démolition : la fusion de l'explosif à la vapeur ou dans les bains d'eau chaude (> 80°C). L'installation fut pilotée et exploitée par deux compagnies d'infanterie et une compagnie d'ingénieurs (du célèbre corps d'élite de l'*United States Army Corps of Engineers*). En octobre 1918, de nouvelles dispositions furent contractées pour améliorer les résultats du ramassage et de la récupération. Elles furent explicitées aux généraux des Armées par la note du GQG du 25 octobre 1918[825].

---

[822] National Archives, Washington D.C., number RG-120 221 – 471.6, Box n°11. Chief Ordnance Officer, september 6th, 1918 to salvage Officer, Paris.

[823] National Archives, Washington D.C., number 1917-1919. 71.2-77, B7. Instruction for check, storage and handling of gas warfare material. June 15, 1918.

[824] *Ibid.* Une partie est directement pompée dans le proche canal du Berry. Les 1 000 personnes affairées sur le site sont, quant à elles, approvisionnées en eau par des puits créés à cet effet sur le site lui-même. Les eaux usées sont dans un premier temps directement rejetées dans le canal sans aucun traitement de quelque sorte. Les autorités françaises de Bourges, qui sont responsables et propriétaires du canal demandent alors que soit installées des unités de traitement avant rejet. Du charbon est acheminé sur le site depuis Nevers.

[825] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Grand Quartier Général. Etat-Major. Inspection Générale de l'Artillerie & Direction de l'Arrière. Note n° 8. 696 / D.A. *op. cit.*

2. Procédés de neutralisation des REG et autres engins de guerre « irrécupérables »

2.1. IDENTIFIER, TRIER ET ORIENTER

La première tâche des artilleurs / artificiers affectés à la récupération face à une découverte sur le terrain de REG était d'identifier le type et la nature (explosive, chimique, à balle, etc.), les origines (françaises ou étrangères), d'apprécier l'état de conservation afin d'évaluer leur dangerosité immédiate ou différée en cas de manipulation et donc leur caractère transportable ou non. Le tri des engins relevait du jugement et de l'expertise des personnels affectés à la récupération, et en particuliers d'artilleurs hautement qualifiés.

Les munitions intransportables car jugées instables, dangereuses ou « douteuses » identifiées par les équipes de récupération devaient être neutralisées sur place, au plus près des lieux de la découverte (sans ou avec un minimum de manipulations) pour des raisons de sécurité.

Ce processus diffère peu de celui encore en vigueur parmi les professionnels de la recherche des engins de guerre et du déminage (Sécurité civile). Les engins considérés comme transportables, en bon état, potentiellement réutilisables, étaient dirigés vers des centres de rassemblement pour être à nouveau triés, puis de là, soit directement reconditionnés et ré allotis dans des dépôts réguliers soit démolis sur des terrains spécialement dédiés aux destructions. D'autres étaient dirigés vers des centres spéciaux avancés de réfection pour être remises en état avant d'être à nouveau engerbées dans des dépôts. Enfin, les engins allemands furent regroupés pour être stockés et réservés à part, isolément et le plus loin possible des habitations.

2.2. METHODE DE DESTRUCTION DES REG

« Plutôt en laisser un de trop que d'en ramasser un de trop[826]*»*

Aucune note, instruction officielle n'a été identifiée dans les archives consultées concernant les méthodes et moyens à mettre en œuvre dans l'armée française pendant les hostilités pour démolir les munitions. Possiblement, ces consignes n'étaient pas nécessaires, car tacites, les personnels de l'Artillerie auraient été suffisamment compétents et sachants en la matière de par leur formation militaire.

La méthode alors en vigueur pour détruire et neutraliser les munitions intransportables et/ou inutilisables, voire, dangereuses, était le « pétardement »[827]. Cette opération d'éclatement contrôlé consistait à apposer sur le projectile à neutraliser une puissante charge explosive dite « donneuse » (pétard, généralement de la *Mélinite* chez les Français), dotée d'une amorce reliée à un détonateur et/ou un cordon détonant, actionnée à distance une fois le personnel artificier positionné en sécurité. Le pétard en fonctionnant transmettait la détonation « par sympathie » à la charge explosive de l'engin qui, en détonant à son tour, se disloquait.

[826] Zweig, A. (1935). *L'Education héroïque devant Verdun*, *op. cit*. p. 277.

[827] BIP, *Blowing-In-Place*.

La transmission par sympathie était connue des militaires. Elle est explicitement décrite par Ernst Jünger dans son récit *Orages d'Acier*, lorsqu'il procéda lors de moments d'ennui au front à la destruction par jeu de munitions non explosées de tout calibre et qui pouvaient être récupérées à foison sur le champ de bataille. Il écrit « *Nous ramassons par temps de brouillard les obus non éclatés, gros et petits, parfois des projectiles de près d'un quintal, qui ne manquent pas dans ces parages. Nous les alignons à quelque distance comme des quilles, pour les prendre sous notre tir, à l'abris derrière les créneaux. Pas besoin de carton : un coup au but, c'est-à-dire sur la fusée, s'annonce de lui-même un fracas épouvantable, qui se multiplie de lui-même quand nous avons « culbuté les neuf », autrement dit, quand l'explosion se transmet à toute une rangée d'obus*[828] ».

La destruction de munitions s'effectuait sur des engins épars (cf. Figure 130) ou volontairement rassemblés et organisés en tas (dénommé « fourneaux ») (cf. Figure 129), placés dans des trous d'obus, carrières ou des excavations spécialement ouvertes dans le sol par les explosions répétées des fourneaux. Des destructions par l'activation de plusieurs fourneaux furent aussi pratiquées ; les artificiers procédèrent à leur mise à feu à intervalles réguliers de quelques secondes pour pouvoir compter, au son produit, les détonations et ainsi s'assurer du bon fonctionnement de chacun des fourneaux.

Le pétardement des munitions à neutraliser était une pratique déjà maîtrisée par les artificiers avant-guerre. Des dispositifs (de tertres et puits d'éclatement) avaient même été imaginés pour limiter les nuisances potentiellement générées sur l'environnement, comme les projections de terres et des éclats, les ondes de chocs, le souffle. Des archives conservées au Service Historique de la Défense montrent des expériences de pétardement sous tertre d'obus de gros calibre (270 mm) endommagés et rendus instables suite à une explosion accidentelle survenue dans un atelier de chargement de l'Ecole Centrale de Pyrotechnie de Bourges (département du Cher) le 10 octobre 1890 (cf. Figure 128).

Les destructions par éclatement sous tertre (formé de sable et de terre) et en puits furent expérimentés, tout comme l'abandon des projectiles par leur enfouissement / ennoyage dans des puits, au sein de la nappe phréatique[829].

Un document cinématographique de l'ECPAD et une série de clichés photographiques montrent des opérations de destruction par pétardement de munitions françaises par du personnel militaire français (du Génie) près de Crugny (département de la Marne) en octobre 1917 (cf. Figure 129). Les motivations des démolitions de ses propres munitions en temps de guerre ne sont pas renseignées dans les archives consultées dans le cadre de cette recherche. Toutefois, deux hypothèses plausibles et cohérentes peuvent être avancées. Les projectiles en question étaient des grenades et des bombes empênées à ailettes (type « Crapouillot »). Ces engins inutilisés et laissés en dépôt à l'air libre, exposés aux intempéries et aux cycles de température diurne / nocturne, s'altéraient, devenaient de conservation douteuse et d'usage dangereux. Le chargement en explosifs (per)chloratés se contractait, les sels de (per)chlorate, sensibles aux chocs et à la friction, se dissociaient de la paraffine sensée les stabiliser. Ces explosifs devenaient instables. Ou s'agissait-il de projectiles récupérés, tirés, non explosés dont il fallait se débarrasser au plus vite ? Les clichés sont en effet annotés « destruction par le Génie d'engins explosifs non éclatés ». La démolition de ces matériels dangereux, inutilisables s'imposait.

---

[828] Jünger, E. (1920). « Orages d'acier. Chronique quotidienne de la guerre de tranchée ». In *1914 – 1918. Français et Allemands dans les tranchées*. Librairie Générale Française. 2013, *op. cit.* p.301.

[829] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur les dispositions prises pour la destruction des obus de 270 de 3 calibres, restés dans l'enceinte de l'Ecole après l'explosion du 10 octobre 1890. 21 novembre 1890.

Le pétardement était une pratique courante pour éliminer les engins de guerre hors service durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental. Il est aussi vraisemblable que des munitions non explosées aient aussi été abandonnées sans être détruites par leur enfouissement ou leur coulage dans des étangs, cours d'eau et fossés. Arnold Zweig, dans son récit « L'Education héroïque devant Verdun » décrit « *Grâce à Knappe, il s'est bien vite initié à toutes les particularités qui distinguent un obus dangereux d'un obus inoffensif. Son coup d'œil rapide voit tout, et il n'a pas été long à former une poignée d'hommes tout aussi habiles dans ce genre d'exercice « Plutôt en laisser un de trop que d'en ramasser un de trop », telle est sa devise. Les marmites spécialement dangereuses sont entourées de piquets – on trouve partout du fil de fer rouillé ou des branches – et si c'est nécessaire, on plonge le projectile dans un fossé rempli d'eau, où cet individu suspect sera mis hors état de nuire*[830] ». Aucune archive collectée dans le cadre de cette recherche ne relate de telles pratiques.

[830] Zweig, A. (1935). *L'Education héroïque devant Verdun*, *op. cit*. p. 277.

Figure 128 : Préparation d'un dispositif d'amorçage d'une fourneau d'éclatement sous tertre à l'Ecole Centrale de la Pyrotechnie de Bourges en novembre 1890[831].

[831] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur les dispositions prises pour la destruction des obus de 270 de 3 calibres, restés dans l'enceinte de l'Ecole après l'explosion du 10 octobre 1890. 21 novembre 1890.

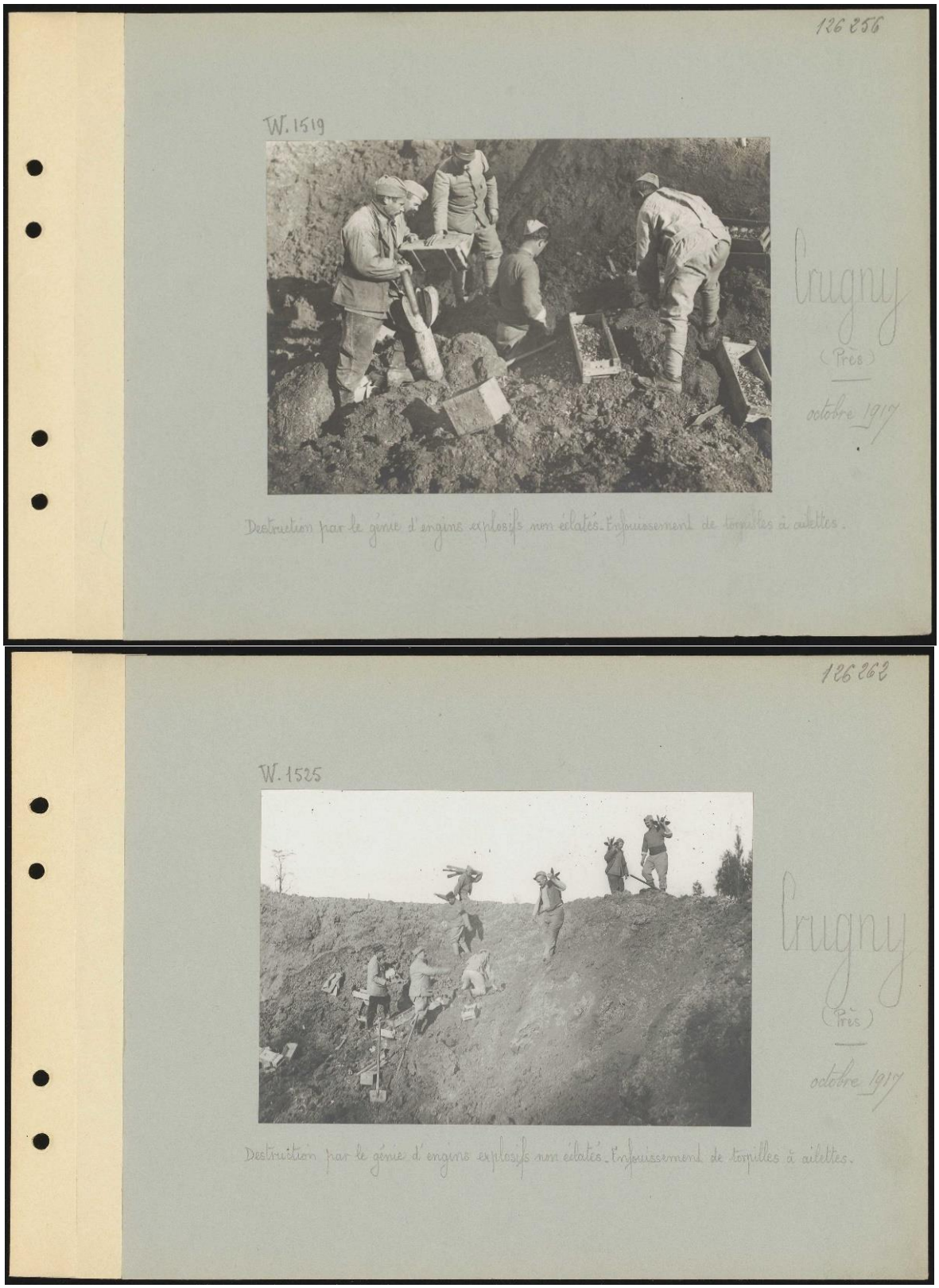


Figure 129 : Planches photographiques de scènes de destructions d'engins de tranchée français par du personnel de l'armée française à proximité de Crugny (département de la Marne) en octobre 1917[832].

[832] La Contemporaine, fond Valois, référence BDIC VAL 068/028 et BDIC VAL 068/029.

Figure 130 : Préparation d'une destruction par pétardement d'un obus isolé de gros calibre non explosé par des sapeurs allemands. Le personnage de gauche déroule le cordon détonant qui actionnera la charge explosive posée sur le projectile par le personnage au centre[833].

2.3. INSTRUCTIONS AMERICAINES SPECIALES POUR LA NEUTRALISATION DES PROJECTILES CHIMIQUES

Les Américains s'avancèrent sur les champs de bataille des derniers instants de la Grande Guerre, période durant laquelle furent produites, utilisées de nombreuses munitions chimiques de plus en plus diversifiées et agressives. Très précocement aussi, dès juin 1918, les Américains prirent conscience que des ordres devaient être donnés par l'Etat-Major aux troupes combattantes afin de cadrer, dans un souci de sécurité, l'emploi de ses propres engins chimiques. Il fut alors aussi expliqué comment éliminer les munitions chimiques non explosées qui pouvaient être découvertes sur le terrain.

Les Américains firent le choix de les détruire par éclatement, méthode atypique qui n'est généralement pas la solution retenue par les artificiers et professionnels du déminage pour ce type d'engins trop peu chargés d'explosifs pour détoner convenablement[834]. La méthode classiquement utilisée pour l'élimination des obus explosifs et des *shrapnels* fut pourtant appliquée aux engins chimiques : (i) ouvrir un trou de 1,8 mètre de profondeur, (ii) y empiler les munitions et placer au centre du fourneau une charge militaire explosive raccordée à un cordon détonant, en s'assurant que le chargement du tas de munitions était limité en masse afin de ne pas dépasser 100 livres[835] de gaz. Le fourneau était ensuite recouvert de sacs de sable afin de réduire la projection des éclats métalliques et du contenu généralement liquide des engins. Toute l'opération était réalisée par des personnels portant des protections respiratoires et corporelles, masques à gaz, depuis la constitution des fourneaux à l'inspection finale au terme de l'explosion et de la dispersion du nuage gazeux. Cette solution fut aussi celle retenue pour les engins fuyards épars.

---

[833] Imperial War Museum, number Q 87870.

[834] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Ammunition section. Correspondence.

[835] ~45 kilogrammes.

Elle présente l'avantage d'éliminer instantanément et radicalement le danger que présentent de telles munitions, contrairement à la facilité d'un enfouissement. La solution de l'enfouissement n'était pas écartée mais sous réserve que les engins furent recouverts de chaux (qui neutralise les toxiques comme l'*Ypérite*).

2.4. RECUPERATION PARTIELLE. DEMONTAGE DES MUNITIONS A DETRUIRE PAR LES BRITANNIQUES. UN CAS UNIQUE A WANQUETIN, 1917 ?

Certains REG résultèrent aussi d'explosions accidentelles ou provoquées (suite à un tir hostile ou à un bombardement d'aviation) de dépôts de munitions, durant lesquelles les engins qui ne détonèrent pas furent pour nombre d'entre eux fracturés, déformés, endommagés et projetés parfois à plus d'un millier de mètres du point de détonation. En août 1917, un rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre, portant sur des *« renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques*[836] » fit état des opérations de nettoyage des terrains constellés de munitions endommagées suite à l'explosion accidentelle du dépôt de munitions britanniques à Wanquetin (département du Pas-de-Calais). 40 000 engins inutilisables furent collectés dans un rayon d'un kilomètre autour du point de détonation. Les Britanniques envisagèrent de se débarrasser dans un premier temps des munitions chimiques par enfouissement « *les obus spéciaux ont été enterrés*[837] », s'agissant des projectiles extrêmement risqués à démonter. Les engins *shrapnels* et explosifs furent rassemblés pour être partiellement démontés « *en vue de récupérer le plus possible de laiton et de bronze et aussi à diminuer la quantité d'explosif à faire détoner dans les galeries souterraines*[838] ». Les fusées auraient ainsi été dévissées manuellement ou mécaniquement, les projectiles désolidarisés de leurs douilles par dessertissage (cf. Figure 131). Les fusées fusantes auraient été grillées en surface dans des brassiers protégés par des tôles et gabions alors que les gaines d'éclatement auraient été réservées pour être placées dans des galeries spécialement creusées pour y être pétardées. Les projectiles débarrassés de leurs douilles et fusées auraient été entassés dans d'anciennes galeries de sapes abandonnées (trois galeries de 65 m de longueur à 15 m de profondeur) pour être détonées sous terre. Les archives ne précisent pas si ces opérations ont été mise en œuvre ou non par les Britanniques.

Il s'agit de la seule mention à une opération de démontage et de récupération sur un stock de projectiles à rebuter durant les hostilités identifiée dans les archives à la faveur de ce travail de recherche. Les archives consultées ici ne permettent pas d'analyser s'il s'agissait d'une opération exceptionnelle et isolée, retranscrites de ce fait dans des documents d'archives, ou d'une pratique commune dans l'armée britannique. Elle augurait celles qui furent mises en œuvre à l'échelle industrielle dans l'entre-deux-guerres pour neutraliser, démonter les engins de guerre à rebuter, et récupérer les matières valorisables constitutives. Avec en tête de file pour ces opérations, un britannique, Francis Norman Pickett (cf. Section 10h du présent manuscrit).

---

[836] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre. Renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques. Le Lieutenant-colonel d'artillerie (signé : illisible). 10 août 1917.

[837] *Ibid.*

[838] *Ibid.*

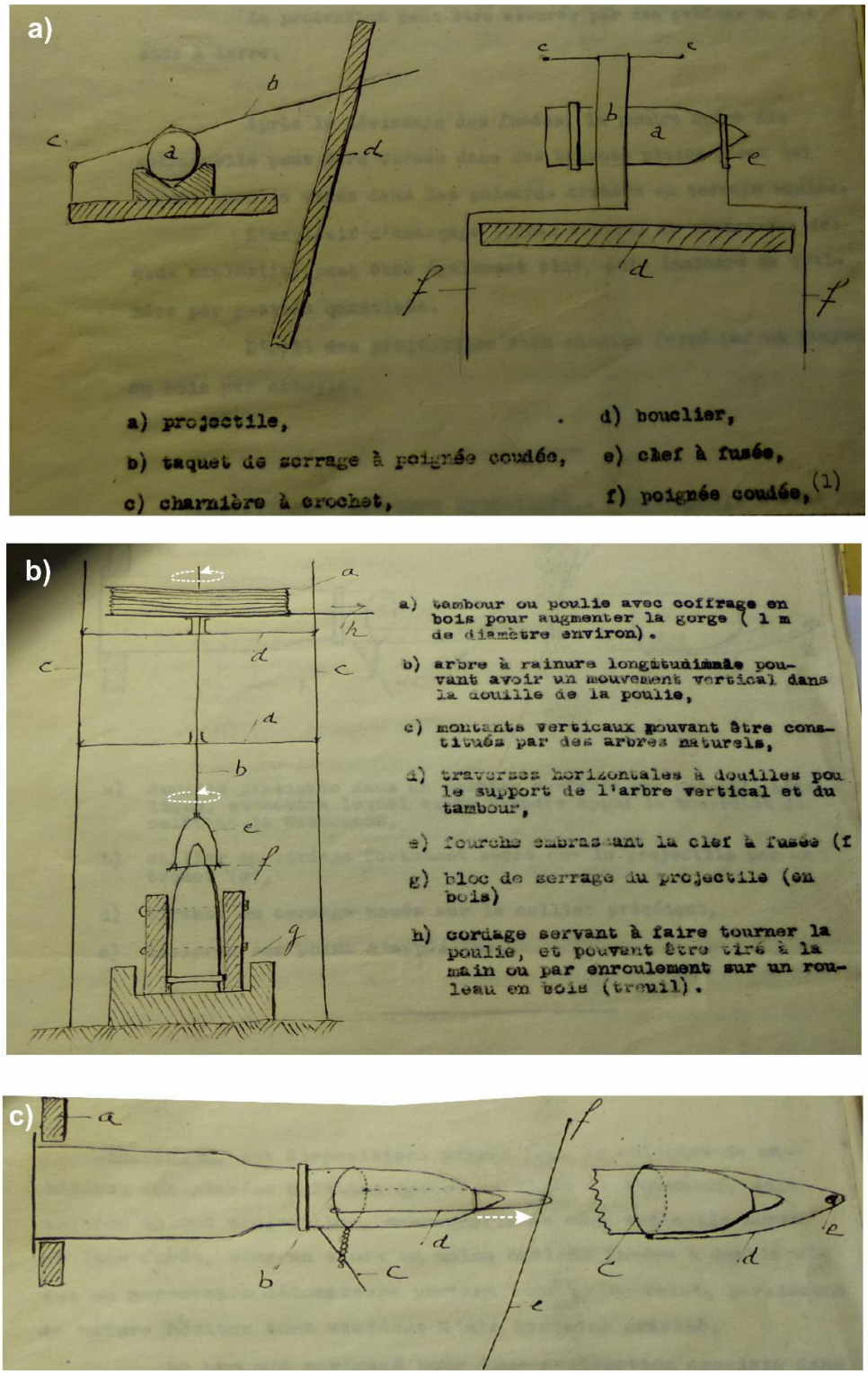


Figure 131 : Opérations de démontage partiel des coups complets britanniques endommagés lors de l'explosion du dépôt de Wanquetin (département du Pas-de-Calais) à des fins de récupération du bronze (fusées) et du laiton (douilles) et de destruction des éléments non récupérables. a) et b) Bancs de dévissage des fusées c) dessertissage et désolidarisation douille / obus[839].

[839] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre. Renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques. 10 août 1917, *op. cit.*

3. Résumé et conclusions de la Section 5h

Produire massivement et rapidement des munitions en temps de guerre fut un premier challenge, user parcimonieusement de ces armes dans un souci d'économie des moyens et ne pas gaspiller le matériel au front en fut un autre. Le feu de l'Artillerie se déchaîna dès 1914. Les nombreux incidents de tir de l'artillerie eurent pour conséquence de cribler et de « polluer » les sols des champs de bataille d'engins non explosés qui représentaient un réel danger pour les militaires et les civils une fois ces terrains, initialement interdits par le feu, réinvestis, mais constituèrent aussi une perte sèche de matières par un matériel inopérant.

Les mouvements des armées, lors des avancées et plus encore au moment des replis, s'accompagnèrent aussi d'abandons sur le terrain des anciennes lignes et positions des batteries d'artillerie de projectiles et matériels explosibles. La récupération et le retrait des sols des engins non explosés abandonnés (REG) s'affirma comme une nécessité découlant d'une triple préoccupation en temps de guerre :

I. Récupérer des matériels et matières réutilisables, sans ou après réfection, afin de limiter le gaspillage et soulager les besoins en approvisionnement depuis les arrières ;
II. Garantir la protection des populations civiles contre les risques d'incendie et explosion ;
III. Libérer les terres agricoles reprises à l'ennemi, encombrées de munitions et matériels de guerre, afin d'autoriser en toute sécurité la reprise du travail de la terre et sécuriser depuis ces arrières l'approvisionnement en denrées et fourrages des soldats et montures au front. Ne fallait-il pas y voir là aussi une opération de « pacification des sols » aux dimensions symboliques par la reconquête sur l'ennemi du sol national et y restaurer des pratiques ordinaires du temps de paix ?

Toutes les parties belligérantes engagées sur le front occidental partagèrent en 1914 cette préoccupation commune, d'avoir à chercher des solutions rapides à la pénurie en munitions et en matières constitutives des engins de guerre, face à une consommation inattendue et non anticipée de projectiles (crise des munitions).

Si la nécessité des opérations de récupération est indiscutable et consensuelle parmi les autorités militaires comme civiles dès le début de la guerre, la question de leur pertinence en temps de guerre suscita le débat. La récupération militaire impliquait en effet de soustraire du personnel affairé aux tâches combattantes pour les réaffecter à des tâches non combattantes. Cette problématique se posât avec insistance et acuité à chaque fois que des terrains étaient repris à l'ennemi ou avaient bon espoir de l'être, notamment en 1914 et 1916. Ainsi, les premières informations préventives à l'adresse des civils concernant les risques liés au REG entre les rivières Marne et Aisne, et les premières instructions militaires relatives à leur récupération, émanèrent du commandement des 2e et 6e Région militaires en septembre 1914, quelques semaines à peine après la fin de la première bataille de la Marne.

La nécessité de la récupération est née de la guerre et dans la guerre. La récupération des REG devint périlleuse et n'attendit pas la fin de la guerre à l'instar de ce que traverse actuellement l'Ukraine, mais s'inscrivit pour la première fois dans la dynamique et la temporalité du conflit.

A compter du second semestre 1916, l'accélération des travaux de remise en état des sols agricole sous l'impulsion du Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des régions envahies se traduisit mécaniquement par le besoin de renforcer les moyens de la récupération avec, en creux, en temps de guerre, la problématique insistante de la main d'œuvre allouée à ces tâches. Les personnels militaires, artilleurs et sapeurs du génie, furent aidés en cela par des Prisonniers de Guerre (PG), des civils, incités par le versement par l'autorité militaire de primes forfaitaires indexées sur la nature des objets collectés.

La récupération s'imposa durant la guerre comme une nécessité chez toutes les parties belligérantes mais avec des finalités sensiblement différentes**.** Elle était essentielle pour les corps expéditionnaires britanniques et américains (se traduisant par la création de services spéciaux, les *Salvage*), car loin de leurs bases et sources d'approvisionnement, et les Allemands, dont les approvisionnements furent drastiquement mis sous tension par le blocus britannique et l'amenuisement de certaines ressources tirées du sous-sol sous contrôle allemand. Les unités de récupération allemandes (*Sammelbataillon*) se livrèrent alors à un vandalisme légitimé et au pillage systématique en règle en territoire occupé.

Côté français, la récupération et la libération des anciens champs de bataille des REG étaient incontournables et impérieux car constituaient avant tout des prérequis indispensables aux travaux de remise en état des sols agricoles et à la reprise des cultures pour alimenter les populations civiles et militaires. Les services de la récupération alliés étaient en relation. Le *Salvage* de l'AEF débarqué en juin 1918 commença ainsi à tirer les enseignements de celui du BEF. Les protocoles opératoires des détachements de récupération français comme alliés étaient en effet peu ou prou similaires. Le Commandement unique français s'attacha à ce que des consignes fussent passées aux corps expéditionnaires britanniques et américains pour une harmonisation des bonnes pratiques et s'assurer que les sols agricoles des secteurs alliés soient bel et bien débarassés des REG au même titre que les sols sous contrôle français.

Les munitions transportables, françaises, comme étrangères étaient selon leur nature et leur état dirigées vers des dépôts réglementaires, des centres de triage et de rassemblement ou encore des centres de réfection. Les munitions allemandes furent réservées et rassemblées dans des centres qui leur étaient dédiés, loin des habitations. Certains engins en bon état furent utilisés de suite après leur ramassage. Les projectiles et autres matériels ou matières explosibles jugés intransportables ou « douteux » étaient détruits sur place au plus près des lieux de découverte. La méthode communément utilisée pour parvenir à ces fins était le pétardement, c'est-à-dire la détonation provoquée des engins « par sympathie » et contrôlée à distance. Ce pétardement était pratiqué sur des engins épars ou sur des tas de munitions (fourneaux) spécialement constitués pour ces destructions. Ces méthodes efficaces et radicales sur des engins explosifs étaient aussi utilisées par les artificiers de l'AEF pour neutraliser les munitions chimiques. Enfin, certaines archives britanniques font mention d'opérations de démontage de projectiles endommagés pour récupérer un maximum de matières réutilisables et ne pétarder sous terre que le stricte nécessaire. Peut-être là une préfiguration britannique des pratiques de récupérations des matières valorisables constitutives des engins de guerre opérées dans l'entre-deux-guerres ? Le triage et la ventilation des projectiles tirés ou non découverts sur et aux abords des anciens champs de bataille sont illustrés par la Figure 132 ci-après.

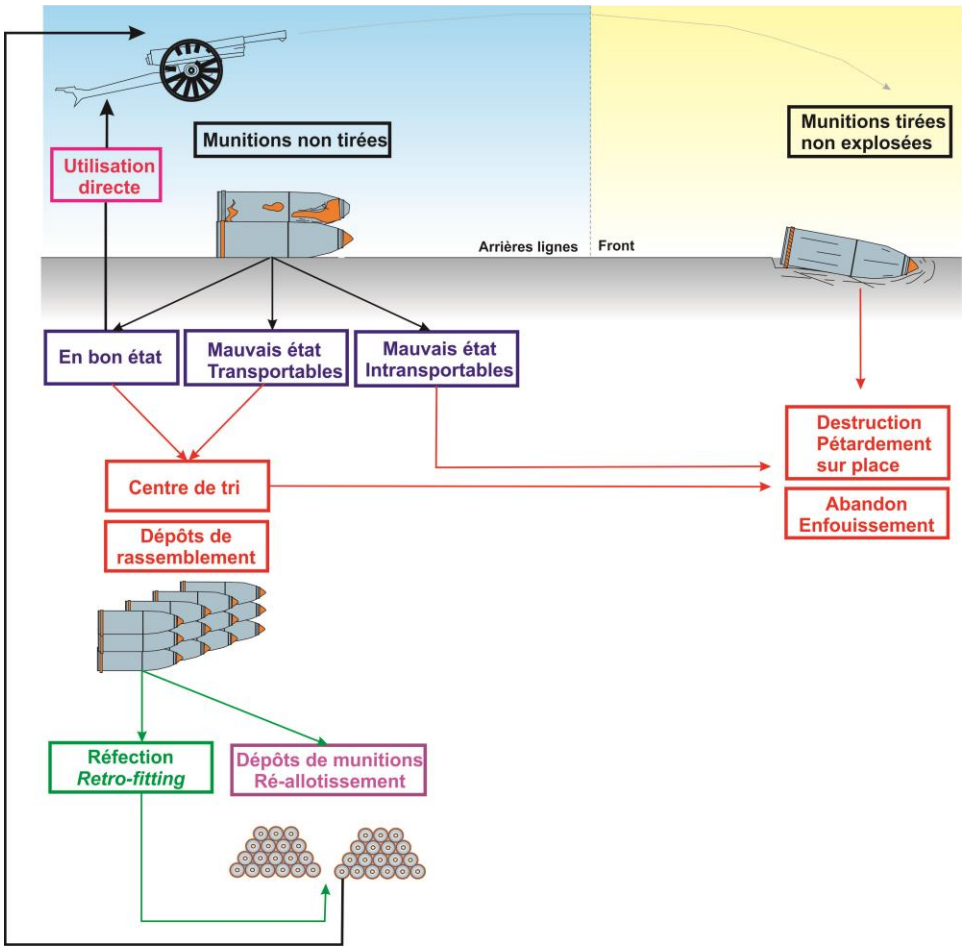


Figure 132 : Devenir des munitions récupérées durant la Première Guerre mondiale par le Service de la récupération (France) et les Salvage (USA, Grande-Bretagne).

Le 18 août 1917 fut signé un décret visant la création d'un Service spécial de la récupération, rattaché au Ministère de la Guerre, chargé de la remise en état du sol « *des régions reconquises sur l'ennemi* ». Le Service spécial se substitua progressivement aux personnels des armées et fut placé sous l'autorité du Ministère de la Guerre lorsque les opérations de remise en état du sol avaient un caractère purement militaire (recherche et destruction des projectiles non explosés, comblements de mines et galeries souterraines, etc.). Le Service spécial fut rattaché au Ministère de l'Agriculture dès que la tâche à connotation militaire avait été exécutée. La récupération civile comme militaire était indissociable (i) des opérations de désobusage qui entraient dans les compétences et les responsabilités du Service de l'Artillerie, mais aussi (ii) des travaux de remise en état des sols menés par l'Etat via des services spéciaux créés à cet effet en 1917.

L'interdépendance de ces opérations, l'imbrication des rôles et responsabilités de nombreux acteurs civils et militaires rendirent pendant la guerre l'exécution et l'organisation du nettoyage des anciens champs de bataille et de la remise en état des sols d'une extrême complexité. Une conférence interministérielle se réunit en janvier 1918 pour notamment coordonner les travaux déjà entrepris isolément par les différents acteurs de la récupération. La mission de cette conférence était donc de préparer un texte unique destiné aux détachements de récupération et devant être porté à la connaissance de toutes les unités en élaguant les prescriptions de détail et les règles concernant les évacuations sur l'intérieur. La conférence interministérielle déboucha sur les Instructions du 3 mai 1918. Dans chaque armée, un plan de récupération fut établi ayant pour but d'organiser un ramassage méthodique. Son rythme était dicté par celui des bombardements et des combats.

Le Service de la Récupération de l'AEF (le *Salvage*) fut créé en juin 1918 dès l'engagement pleinement opérationnel des troupes américaines sur le sol français, et dont les missions, l'organisation, le fonctionnement et le *modus operandi* s'approchaient peu ou prou de celles et ceux du Service français de la récupération.

Avec la reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918 et le déplacement vers le nord-est des lignes de front, la récupération dut s'adapter à la nouvelle physionomie de la guerre, par notamment une réaffectation des tâches de la récupération des unités combattantes vers, lorsque les opérations militaires l'autorisaient, des personnels militaires non combattants**.** La nouvelle organisation de la récupération fut énoncée par la note du GQG du 25 octobre 1918. Les anciennes zones de combat, libérées, furent découpées en secteurs « de récupération » d'étendues telles qu'ils pouvaient être raisonnablement explorés et nettoyés par un détachement. Selon l'éloignement au front, la récupération était soit assurée par les batteries de l'artillerie, soit les Parc d'Artillerie Régionaux des Corps d'Armée, ou encore, plus à l'arrière, par les armées. Le dessein de cette récupération à l'avant était aussi de pourvoir les batteries en marche vers les frontières allemandes sans faire appel aux approvisionnements depuis les arrières. La récupération apparaît donc, dans la dynamique de la guerre de mouvement de 1918 puis dans la perspective d'une cessation prochaine des hostilités comme une variable d'ajustement des approvisionnements de l'Artillerie pour garantir, sur un front mouvant, la constance d'une puissance de feu décisive tout en cherchant à limiter autant que faire se peut l'approvisionnement par du matériel nouveau depuis les arrières. La refonte de la récupération en 1918 marqua d'une pierre angulaire la naissance d'une structure d'abord embryonnaire, qui allait ensuite devenir à la fin des hostilités le « Service spécial du désobusage ».

En 1918, comme durant les années de guerre qui précèdent, la récupération pâtit d'un manque de personnel et de main d'œuvre. Les moyens de la récupération restaient sous-dimensionnés, disproportionnés au regard des quantités de projectiles et matériels délaissés à ramasser et à gérer. Le GQG était parfaitement conscient que la récupération et le désobusage syn-conflit étaient superficiels et partiels.

En 1918 les quantités de REG et autres épaves de guerre abandonnées sur et aux abords des anciens champs de bataille mais aussi à l'arrière augmentèrent considérablement. Les moyens humains, matériels alloués durant la guerre à la récupération des REG et à la destruction des matériels dangereux irrécupérables, ainsi que les organisations dédiées à ces opérations, apparaissaient à l'armistice dérisoires par rapport aux quantités de REG à gérer. De nouvelles organisations, méthodes, moyens devaient être pensés, rendus opérationnels au plus vite pour répondre aux défis et enjeux imposés par cette situation héritée de la guerre, dans cette transition délicate, complexe, du temps de guerre vers le temps de paix.

La section qui suit est précisément consacrée (i) à la nature, la genèse, à l'estimation des quantités considérables de matériels de guerre et REG présentes sur les sols de France et de Belgique à la cessation des hostilités ainsi qu'à (ii) l'analyse des problématiques et enjeux qu'elles sous tendaient.

Section 6h. « *The iron harvest*[840] ». Restes Explosifs de Guerre abandonnés et surplus au terme des hostilités. Origines, géographie et enjeux.

1. Introduction de la Section 6h.

« Les Allemands ont laissé de ces trésors, personne n'accorde même un regard à ces réserves abandonnées sur place [841]*»*

Au moment de la cessation des hostilités sur le front occidental en novembre 1918, des quantités considérables de matériel de guerre, munitions, poudres, explosifs et autres matières agressives étaient présentes sur les territoires de France et de Belgique. Cette section décrit les processus ayant conduit dès l'automne 1918 à des accumulations inédites de Restes Explosifs de Guerre sur et aux abords des anciens champs de bataille, mais aussi plus à l'arrière dans les dépôts, de base, intermédiaires ou avancés, côté allié comme allemand, en France comme en Belgique. Une estimation des tonnages des REG et autres engins de guerre excédentaires sur et/ou en lien avec le front occidental est proposée et discutée. Enfin, une sous-section s'attache plus particulièrement à identifier et décrire, dans le contexte de l'immédiate sortie de guerre, la géographie des REG, les problématiques et les enjeux inhérents à ces matériels hérités de la guerre. Les quantités considérables de matériels de guerre occupaient à l'armistice deux secteurs géographiquement dissociés où ces matériels différaient par leur nature, leur hétérogénéité, leur environnement et leurs conditions d'entreposage**.** On distingue d'une part (i) les Restes Explosifs de Guerre au droit et aux abords des anciens champs de bataille et d'autre part (ii) les surplus et excédants de guerre dans les zones des armées et à l'arrière.

2. Origine et géographie

2.1. TYPOLOGIE

Les archives et les documents photographiques consultés font état ou montrent la présence au droit et aux abords des anciens champs de bataille du front occidental de nombreux engins sans qu'il soit généralement précisé s'il s'agit de projectiles non utilisés laissés sur place ou de munitions tirées non explosées ayant ricochées ou s'étant légèrement enfoncées dans les sols meubles. Aucune statistique portant sur la quantité et/ou la typologie des projectiles abandonnés n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche.

[840] Littéralement « les récoltes de fer ».

[841] Zweig, A. (1935). *L'Education héroïque devant Verdun*, *op. cit*. p. 277.

Aux engins tirés et non explosés (UXO) gisant épars à même la surface du sol ou à peine dissimulés par la végétation, la boue, non récupérés et/ou non démolis par les unités de récupération et *Salvage* durant la guerre, s'associaient un ensemble de matériels très hétérogène constitué de poudres (propulseurs), d'explosifs, en vrac ou conditionnés en caisses, fûts, et de projectiles d'artillerie de campagne, lourde ou de tranchée (mines et grenades) non utilisés auxquels s'ajoutaient divers engins pyrotechniques (pétards, artifices, signaux, torches, etc.). Ces matériels furent généralement abandonnés à la faveur de la confusion des combats et/ou lors de micro-mouvements opérés durant la guerre de position.

Ces restes et épaves de guerre étaient issus de toutes les parties belligérantes engagées dans la joute d'Artillerie durant la Première Guerre mondiale sur l'ancien front occidental. Les Allemands utilisèrent aussi sur ce front des pièces d'artillerie et des munitions réquisitionnées comme butin de guerre et provenant des arsenaux russes. Les UXO étaient d'une très grande diversité tant en calibre qu'en nature du chargement ou encore en année de confection et de tir. Certains étaient en bon état, d'autres endommagés à l'impact.

2.2. GEOGRAPHIE ET ORIGINES

La géographie (distribution spatiale) des REG est indissociable des processus qui les ont générés.

2.2.1 Incidents de tirs sur le front bombardé et petits dépôts avancés abandonnés

Les territoires où se concentrèrent les REG étaient d'abord ceux des anciennes lignes de front et de leurs abords (les zones des Etapes), le long desquels se déroulèrent les principaux duels d'artillerie durant la guerre, des bombardements et échanges de tirs d'intensité et de récurrence variables selon les secteurs. Etaient particulièrement concernées les 1er, 2e, 6e Régions militaires (Nord Pas-de-Calais, Picardie, Champagne, Ardennes, Meuse, Meurthe-et-Moselle) et en moindre mesure les 7e (Vosges, Haute-Marne et Franche Comté), 20e (Meurthe-et-Moselle, Aube) et 21e (Vosges, Haute-Saône) Régions militaires. En Belgique, les combats entre Français, Britanniques et Allemands prirent comme décor les plaines boueuses de la Flandre occidentale, entre Nieuport au nord sur le littoral de la Mer du nord, et les Monts des Flandres au sud avec comme épicentre des combats le secteur d'Ypres et Wytschaete. Les secteurs d'Ypres, de l'Aisne, de la Champagne et de Verdun figurent parmi les plus bombardés de la Grande Guerre, d'importantes batailles s'y étant déroulées des premières heures à la conclusion du conflit. Les secteurs de guerre de mines furent parmi les plus affectés par l'usage des explosifs car, sur ces secteurs très prisés, les duels d'artillerie et les attaques souterraines répétées, mobilisant d'importantes quantités d'explosifs, succédèrent aux assauts en surface. Les sols de ces territoires furent intensément criblés par de nombreux engins qui fonctionnèrent comme escompté, mais dysfonctionnèrent aussi pour environ un quart des projectiles vectorisés (constituant des incidents de tir). Selon l'incidence de la trajectoire à l'impact, les masses, profils des projectiles et la nature des sols, ces engins ricochèrent et restèrent gisant en surface (cf. Section 4h du présent manuscrit).

Quelques témoignages et rapports conservés aux archives relatent l'importance des engins de guerre constellant les anciens champs de bataille à la fin des hostilités. Ainsi, par exemple, le Sous-Inspecteur (du Cantonnement de Bruges, en Belgique) fit état auprès de Mr l'Inspecteur « *qu'il existe encore en ce moment de nombreux engins de toutes sortes : obus, bombes, grenades, dans les bois domaniaux de Houthulst et de Zonnebeke, un peu partout dans les diverses parcelles*[842] ».

[842] Musée de l'Armée, site de Evere, Bruxelles, Belgique. Courrier du 29 mai 1922.

Des terrains criblés de projectiles furent aussi décrits dans les Monts des Flandres et dans le Saillant de Wytschaete, au sud de la Crête de Messines « *Il est encore un point de vue que vous négligez d'observer : c'est que par son étendue et sa situation au pied du Mont Kemmel, en face duquel ses crêtes s'allongent sur un front de plus de 4 000 m, le territoire de Wytschaete était prédestiné pour servir à des positions d'artillerie ; aussi en a-il-été criblé durant toute la guerre. Au moment de l'offensive allemande sur le Mont Kemmel, ses routes principales et secondaires, tous ses chemins d'accès et jusqu'aux moindres sentiers servirent à des dépôts de munitions et l'on peut dire que son sol en fut littéralement saturé. Il avait encore cet aspect, du reste, quand le service d'enlèvement a pu reprendre la succession du service de récupération dans cette zone un an et demi après l'Armistice* [843]».

La seule source d'informations concernant les quantités de munitions abandonnés fin 1918 furent celles de l'après-coup de la guerre, lorsqu'il s'agit de récupérer, détruire et de neutraliser ces engins à partir de fin 1918. Des informations plus précises furent produites et apparurent dans les archives vers 1920 dès que cette récupération fut encadrée par des contrats entre entreprises privées et l'Etat (cf. Section 8h du présent manuscrit). La contractualisation et le contrôle par l'autorité militaire de l'exécution des marchés permirent de tracer ces activités dans des documents administratifs officiels émanant du Ministère de la Guerre et du Ministère des Régions Libérées qui se partagèrent le pilotage et les responsabilités de ces opérations. Avant cette date, les quantités d'engins alliés comme allemands restent imprécises, parcellaires, souvent locales.

La Figure 133 et la Figure 134 donnent des aperçus photographiques des REG abandonnés sur et aux abords immédiats des anciens champs de bataille lors de la cessation des hostilités.

Des caches avaient aussi été organisées dans les ruines à proximité des anciennes lignes de front. De petits dépôts de circonstance avaient été constitués par les combattants dans les abris et tranchées, les souterrains (cf. Section 4e du présent manuscrit et l'exemple de Vauquois et de l'Argonne) et à proximité des batteries d'artillerie. Ces matériels furent abandonnés dans la confusion des combats et lors de la retraite allemande comme nous allons le voir au § 2.3 de la présente section.

[843] Musée de l'Armée, site de Evere, Bruxelles, Belgique. Le Ministre de la Défense Nationale à Messieurs les Bourgmestres et Echevins de la commune de Wytschaete.

Figure 133 : Projectiles lourds non tirés abandonnés sur le champ de bataille de Verdun (département de la Meuse) parmi les barbelés, queues de cochon et tôles cintrées. Le terrain apparait bouleversé et les arbres réduits à l'état de « chandelles ». Non daté[844].

Figure 134 : Projectiles allemands et leurs paniers en osier abandonnés en désordre. Visite de Sir Edward Kemp, Ministre des Forces militaires d'outre-mer du Canada à compter d'octobre 1917. Noter à sa droite, deux obus fracassés. Il s'agit ici possiblement d'une position d'artillerie allemande qui a été pilonnée[845].

[844] Collection particulière, Hubé, D.

[845] Musée de la guerre du Canada. Collection d'archives George-Metcalf MCG 19930012-534.

2.2.2 Au-delà du front

Les territoires délaissés par les armées lors de la reprise de la guerre de mouvement

L'importance de l'encombrement des abords des anciens champs de bataille par les REG fut sans conteste une conséquence directe de l'abandon de matériel de guerre par les Alliés lors de leur progression vers les frontières allemandes en 1918 et concomitamment par les Allemands à la faveur de leur retraite (cf. § 2.3). Les Allemands délaissèrent en effet sur les sols de France et de Belgique et sous terre, sur leurs anciennes positions, dans les abris et autres souterrains de combat exploités pour la guerre de mines, volontairement mais surtout par les exigences d'un repli rapide et forcé, des quantités considérables de matériels à l'automne 1918.

Les dépôts des hinterlands

Les anciennes zones des étapes et les territoires situés en dehors des zones des armées renfermaient aussi de nombreux dépôts de munitions et matériels de guerre desservant le front. Ces dépôts avaient été créés spécifiquement par les circonstances de la guerre où étaient déjà existants avant-guerre, dans les Etablissements de Réserve Générale de Munitions (ERGMu) de l'armée française, ou encore à proximité des usines de production et des ateliers de chargement de munitions. Ces dépôts appartenaient aux forces alliées à l'ouest du front et à celles du *Reich* à l'est (dont ceux des territoires annexés du *Reichsland Elsass-Lothringen* (territoire impérial d'Alsace-Lorraine)). Les Américains avaient installé de vastes dépôts (de base et intermédiaires) le long de leurs axes logistiques, depuis les ports de l'Atlantique jusqu'en Haute-Marne. D'autres munitions étaient entreposées dans les ports de la façade atlantique et de la Manche.

2.3. AUTOMNE 1918. L'ABANDON SUR LES ANCIENS TERRITOIRES OCCUPES DES MUNITIONS PAR LES TROUPES ALLEMANDES EN RETRAITE

2.3.1 Sources

Les armées allemandes déferlèrent en août 1914 sur la Belgique et la France, selon un mouvement éclair parfaitement décrit par l'historiographie. Quatre ans plus tard, dès septembre 1918, ces armées furent amenées à refluer sous la poussée et les contre-offensives répétées des Alliés. Cette retraite s'accéléra significativement dès octobre 1918. Il s'agit d'un épisode de fin de guerre peu ou pas documenté ; les informations sont parcellaires et locales. Les quantités de matériels renfermant des matières dangereuses pour l'environnement actuel, des matières explosibles et/ou agressives délaissées sur les anciennes zones occupées, les modalités et conditions dans lesquelles la retraite des troupes allemandes s'opéra restent *« Un point aveugle complet de l'Histoire*[846] ». Plusieurs raisons peuvent être invoquées à cela. Seuls les Allemands étaient alors potentiellement en mesure de documenter cette phase de déroute de leur armée. D'abord, le désordre, l'indiscipline qui régnèrent lors la marche de la retraite (*Rückmarsch*), le délitement des chaînes de commandement et la vitesse avec laquelle les Allemands se retirèrent, n'incitèrent pas à la production d'écrits officiels documentant cette phase peu reluisante, si éloignée de cette « *guerre totalement glorieuse* » (« *Ruhmvohlenkrieg* ») imaginée par le *Kaiser* Guillaume II. Ensuite, l'Allemagne perdit une grande partie des archives relatives à la Grande Guerre et possiblement sur la sortie de guerre lors du bombardement stratégique allié sur Leipzig du 4 décembre 1943. Toutefois, certaines archives dispersées, témoignages, mais aussi des reconnaissances archéologiques menées dans le cadre de ce travail de recherche, semblent apporter un éclairage certes partiel mais original sur cette période grise.

[846] Audoin Rouzeau, S. Communication orale, juin 2021.

L'essentiel de la documentation relative à l'abandon du matériel allemand sur le sol français et belge fut généré par les Français et leurs alliés lors de la cessation des hostilités et dans l'immédiat après-guerre lors de leur prise de possession des territoires occupés et des matériels qu'ils renfermaient. La Ier Armée de l'AEF s'empara ainsi des grands dépôts de la ligne stratégique de la Woëvre (Lissey, Ecurey, etc.) en Meuse. Ces opérations furent filmées pour être montrées[847]. L'abandon de munitions ex-allemandes est aussi décrit dans les archives belges du Musée des Armées (Bruxelles, Evere) concernant l'ancien front de Flandre occidentale.

Il fallut attendre que ces REG générèrent des incendies et explosions accidentelles, à minima anxiogènes, mais souvent sources de blessures, parfois mortelles, et de dégâts aux biens des sinistrés pour que la presse (conservée numérisée à la Bibliothèque nationale de France) s'empara du sujet et que les documents administratifs conservés aux archives (Service Historique de la Défense, archives départementales) firent état de cette situation périlleuse en décrivant les REG à l'origine des sinistres. Ces sinistres relayés par la presse contribuèrent à visibiliser dans les archives la présence des quantités considérables de REG et les problématiques sécuritaires associées.

2.3.2 Conditions générales de la retraite allemande

En septembre 1918, les Allemands se replièrent d'abord sur la ligne *Siegfried* (*Hindenbourg* pour les Alliés) sur laquelle il résistèrent aux Alliés. La retraite s'opéra par une alternance de mouvements et d'arrêts sur une succession de position défensives (lignes *Hermann* et *Hunding-Brunhild*, position *Michel*, position *Anvers-Meuse*), jusqu'à la frontière allemande. En octobre 1918, les troupes allemandes cherchèrent d'abord dans leur retraite à récupérer un maximum de leur matériel et à ralentir la progression des Alliés par le sabotage des voies de communication (ponts, routes, lignes de chemin de fer, etc.). Erich Ludendorff écrivit en 1919 dans ses mémoires « *Il fallait venir à bout de masses énormes de matériel de guerre. Cela devait prendre des semaines et des mois. Je m'attachais particulièrement à faire préparer à fond la destruction des voies ferrées et des ponts qui devaient fatalement avoir une influence sur les opérations et à ramener tous nos stocks jusqu'en Allemagne* [848]».

Les Allemands connurent durant cette phase des difficultés logistiques majeures, dues à l'encombrement des voies de communication, au désordre et à l'indiscipline grandissants au sein de l'Armée allemande, démoralisée et amenuisée, en infériorité numérique par rapport aux Alliés[849]. Ludendorff ajouta « *Les formations d'étapes, y compris les troupes des territoires occupés à l'Est et à l'Ouest, parmi lesquelles le bouleversement était également bien préparé, oublièrent l'ordre et la discipline ; affolées et perdant la tête, elles se précipitèrent vers leurs foyers en pillant* [850]». Puis, les troupes furent aussi ralenties dans leur manœuvre en Picardie par l'état désastreux des pistes et routes sur des terrains que leur propre artillerie avait bouleversés entre 1916 et 1918. Les pneus des camions vinrent manquer.

Les Allemands, abandonnèrent l'idée du rapatriement de leur matériel et se débarrassèrent de tout ce qui n'était pas indispensable et de tout ce qui était susceptible d'entraver la rapidité de leur marche vers la frontière : matériels, projectiles et dépôts de munitions.

---

[847] National Archives, Washington DC. Number 111-h-1485-r2.

[848] Général Ludendorff (1932). Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II, op. cit*. p. 371.

[849] Schwendner, A. (2000), *op. cit*.

[850] Général Ludendorff (1932). Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II*, *op. cit*.p. 394.

Erich Ludendorff écrivit en 1919 « *un grand mouvement de transport de matériel vers l'Allemagne commença. Mais nos communications n'étaient pas favorables à cette opération* »[851], puis « *Partout on gaspilla les biens de l'armée et on détruisit complétement les moyens de défense du pays. Tout ce qui fut perdu à cette occasion représente une valeur incalculable* [852]».

Ces matériels furent donc sciemment abandonnés et endossèrent ainsi à ce moment-là le statut de Restes Explosifs de Guerre ou déchets de guerre. Les territoires balayés par la retraite allemande, entre la rivière Marne et la frontière belge correspondaient aux anciennes zones des armées allemandes, précisément là où avaient été installés leurs dépôts de munitions et de matériels.

2.3.3 Freiner la poussée alliée par la tactique de la terre brûlée

Afin de freiner / ralentir la poussée des Français et de leurs alliés, les Allemands eurent, comme lors du repli stratégique de mars 1917, recours à la tactique dite « de la terre brûlée », détruisant derrière eux les ponts, voies de communication, vergers, troupeaux et tout ce pouvait de près ou de loin servir aux Alliés pour avancer. Ils tentèrent aussi de faire exploser leurs dépôts de munitions – intransportables - voire de les miner pour piéger l'ennemi et couvrir leurs arrières dans la retraite[853]. « *On entend des mines qui sautent, ces bandits avant de partir ont installés des mines à retard avec mouvement d'horlogerie qui éclatent vingt, trente ou cinquante heures après le départ. Aussi il faut prendre beaucoup de précautions*[854] ». Tel fut le sort réservé aux dépôts forestiers (2 000 000 projectiles majoritairement de gros calibre renfermant par ailleurs une forte proportion d'engins chimiques[855]) de Trélon et de Liessies dans le département du Nord, en Thiérache, aux confins du département de l'Aisne et de la Belgique. Seul un des deux dépôts (celui du Parc Jeannette à Trélon) explosa effectivement [856]. Ils firent également exploser un imposant dépôt d'engins chimiques et l'un des principaux ateliers de chargement avancé de toxiques de guerre à Saulnes (*Feldfüllung Anlage 3*) au nord de la Lorraine (département de la Meurthe-et-Moselle), sur la frontière luxembourgeoise. Ce dépôt avait déjà été significativement bouleversé par une violente explosion survenue dans la nuit du 17 février 1918 suite à un bombardement aérien.

A Fourmies, dans l'Avesnois, non loin de Trélon, les Allemands « *ont fait sauter dans la gare de cette localité, 7 trains chargés de munitions, comprenant au total 300 wagons* »[857]. A chaque fois ces détonations laissèrent derrière elles des paysages chaotiques, post-apocalyptiques, faits de ruines, de constellations de projectiles, la plupart endommagés, projetés, jonchant la surface du sol et des souvenirs difficiles dans les populations locales marquées par la guerre (cf. Figure 135).

---

[851] Général Ludendorff (1932). Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II*, *op. cit.,* p.321.

[852] *Ibid.,* p. 395.

[853] Des dépôts allemands ont été piégés par des charges explosives dotées de détonateur « à long retard » dont la mise à feu, différée, fut réglée de sorte à exploser une fois les troupes allemandes évacuées et lors de la prise par les troupes ennemies.

[854] Cabanes, B. (2014). *La Victoire endeuillée. La sortie de guerre des soldats français (1918-1920).* Rapporté par des correspondants stationnés dans la région de Rethel (département des Ardennes). p. 65.

[855] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair Vol. 26 n°329. September, 1921. F.N. Pickett & Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives.

[856] Focquenoy, A. communication personnelle et orale.

[857] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu. D.E. de Dunkerque, Inspection des Munitions n° 670/C du 21 décembre 1918. Signé. P. l'Inspecteur des Munitions. Le Lieutenant Boy, Officier-Chimiste adjoint.

Les Allemands piégèrent aussi les voies de communication : routes et voies ferrées. Des passages à niveau furent minés comme à la station de Waereghem en Belgique[858]. Des primes incitatives furent en réaction aussi allouées par l'Armée française à ceux, civils comme militaires, qui localiseraient et signaleraient les pièges antitanks déposés par les Allemands[859]. Les pièges étaient souvent rudimentaires : de simples obus enterrés sous les pavés, ogives et détonateurs tournés vers le haut et la voie de roulement. Les pièges des dépôts de munitions étaient plus complexes : équipés de détonateurs à long retard, ils étaient destinés à fonctionner de façon différée au moment de l'arrivée des troupes alliées qui en prenaient possession.

Figure 135 : Ruines de la gare de Fourmies (département du Nord) après l'explosion de wagons chargés de munitions allemandes lors de la retraite allemande de 1918. Au premier plan des projectiles de 210 mm éparpillés par le souffle de la détonation[860].

2.3.4 Le fiasco du plan de rapatriement des munitions chimiques chargées en Allemagne

Des archives allemandes relatent l'existence d'un plan de rapatriement des munitions chimiques allemandes chargées sur le territoire du *Reich*. Début 1918, le *Kaiser* Guillaume II et le Roi de Bavière avaient préparé, après avoir imaginé « *une guerre totalement glorieuse* » (*Ruhmvohlenkrieg*), un plan de retraite (*Demobilmachungsplan*) permettant à l'Allemagne de se replier en bon ordre une fois la guerre conclue. Il prévoyait dans sa partie X, point 390, les modalités de gestion des armes en surplus et notamment celles chargées de toxiques de guerre « *Gasmunitionen ist an der Kommendatatur der Gas-Überprüfungplatzes Breloh abzugeben* ». Les munitions chimiques auraient dû être remises au commandement du contrôle de Breloh (Lüneburgerheide, à Münster), le centre majeur d'essai, d'expérimentation (et laboratoire de Fritz Haber, le père de la guerre chimique allemande) et de chargement de toxiques de guerre pour les Allemands. Le rapatriement de ces munitions initialement bien planifié et organisé sur le papier et en théorie, tourna dans les faits et le contexte d'une retraite précipité et subie, au fiasco et au désordre.

---

[858] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Colonel en Chef de la Mission Belge au GQG Français à Monsieur le Maréchal de France du 12 mars 1919. Signé : illisible.

[859] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 12 novembre 1918. Signé : Régnier.

[860] https://www.lavoixdunord.fr/839576/Article/2020-07-14/fourmies-ces-obus-de-la-guerre-1914-1918-qui-ont-continue-de-faire-des-victimes

Le plan de rapatriement ne put être en effet déployé. Une lettre du responsable du *Zentralaufsichtstelle für Sprengstoffen und Munitionsfabrik* (ZAUF, Inspection centrale pour les usines d'explosifs et de munitions) laisse en effet penser que le rapatriement des engins chimiques à la bascule 1918-1919 fut exécuté, à l'instar des troupes et des autres matériels, dans le désordre et la confusion « *En conséquence de la probable retraite de l'armée et du nettoyage des territoires proches de l'ennemi arrivent les munitions en grande partie désordonnées, avec ou sans détonateurs sur les lieux de stockage* [861]».

Le transport sur de longues distances de munitions armées de leur détonateur était une entreprise périlleuse mais possiblement une modalité de transport incontournable des engins chimiques compte tenu de la conception même des projectiles chimiques, la fusée – détonateur (généralement solidaire de l'obus par une cimentation) faisant aussi office de bouchon obturateur des réservoirs d'agents agressifs constitués par le corps des obus. Ces munitions furent dirigées, éparpillées vers 70 dépôts d'artillerie (en Prusse, Bavière, Saxe et dans le Württemberg) déjà exploités durant la guerre et alors agrandis pour accueillir ces excédents.

Dans le désordre de la sortie de guerre et du fait des énormes quantités de munitions concernées par le rapatriement, le contrôle de la nature et des quantités des flux de munitions en entrée des dépôts devint impossible. Les munitions chimiques arrivèrent mêlées aux engins explosifs conventionnels. Un recensement exhaustif des munitions chimiques en surplus à la fin de la Première Guerre mondiale sur le sol allemand devint illusoire. Toutefois, un rapport d'octobre1920 affirme que « *qu'approximativement 1 000 tonnes de munitions à gaz et bouteilles seraient dispersées au sein de l'Empire allemand. Globalement ces projectiles reposent dans 35 dépôts avec 2 millions de tirs*[862] ». Mal entreposées, exposées aux intempéries, les munitions perdaient les marques de peinture permettant de faire la distinction entre munitions chimiques et explosives ajoutant encore une touche supplémentaire à la confusion et à la dangerosité de la situation.

Les motifs pour lesquels un plan de rapatriement spécifique aux munitions chimiques avait été préparé par les plus hautes instances militaires allemandes à la fin de la guerre ne sont pas explicitement précisés dans les archives et les documents consultés dans le cadre de cette recherche. Les Allemands accordèrent une haute importance à l'arme chimique, dans laquelle il jetèrent leurs espoirs de voir se briser et percer le front. Il s'agissait donc de matériel de guerre sur le sol français et belge à haute valeur ajoutée sur le plan militaire aux yeux des Allemands. Deux hypothèses peuvent être raisonnablement avancées justifiant la volonté de rapatriement de ces munitions en cas d'avancée alliée (i) mettre en sécurité des projectiles pouvant être dans ce contexte grandement utiles aux armées pour la défense du sol national, en cas de déplacement de la guerre en Allemagne et/ou (ii) s'assurer que ces engins ne soient pas récupérés par les Français et leurs Alliés, ce qui potentiellement aurait contribué à renforcer encore leur force de frappe. Enfin, les munitions chimiques étaient de conservation douteuse. Un entreposage à Breloh garantissait de bonnes conditions de stockage et la possibilité de maintenance (vidage et remplissage).

[861] Schwendner, A. (2000), *op. cit.*

[862] *Ibid.*

2.3.5 L'abandon des dépôts allemands et caches d'engins de guerre sur le sol belge et français

Un inventaire et un dénombrement des projectiles contenus dans les dépôts de munitions ex-allemandes étaient réalisés localement lors de leur prise par les troupes françaises et alliées au regard des archives consultées. Le dépôt ex-allemand de Barber dans l'Oise renfermaient ainsi par exemple « *100 000 coups d'artillerie, 10 000 coups d'artillerie de tranchée, 55 caisses de poudre, 12 000 grenades*[863] ». Celui de Margot (dans le département des Ardennes étaient quant à lui constitué en date du 10 février 1919 de 24 800 obus de 77 mm, 3 150 obus de 105 mm et 2 150 obus de 150 mm[864]. Les Américains en Meuse dressaient systématiquement des statistiques précises sur ce que les dépôts renfermaient[865]. La Figure 137 donne un aperçu photographique d'un dépôt de munitions abandonné intact par les Allemands en Meuse, au moment de son appropriation par les troupes américaines de l'AEF.

Des listes exhaustives des matériels (tôles, aciers profilés, barbelés, rondins, cadres en bois, etc.) et munitions délaissés par les Allemands furent ainsi dressées par les personnels militaires en charge de la récupération, comme en Alsace et dans les Vosges, occupés par l'armée de De Castelnau[866]. Le corpus archivistique sur lequel s'appuie cette recherche ne permet pas d'inventorier tous les dépôts de munitions ex-allemandes abandonnés sur les sols français et belge. Quelques documents, assez précis, ont été identifiés et concernent notamment la Meuse[867], l'Alsace et la Moselle[868] . Ces listes ne visent que les plus vastes des dépôts. Le tonnage présent dans les myriades de petits dépôts avancés et ceux des batteries n'a pas pu être estimé dans cette recherche. L'absence de renseignements archivistiques permettant de géo localiser ces dépôts se traduit par des découvertes régulières et fortuites de dépôts enfouis, mis à l'affleurement à la faveur de travaux de terrassement ou agricoles, et déclenchant l'intervention des professionnels du déminage, avec, dans certains cas de figure, des évacuations temporaires des populations proches voisines (cf. Figure 136).

Figure 136 : Découverte d'un dépôt enfouis de 1 500 obus datant de la Première Guerre mondiale à Levergies dans l'Aisne en juin 2021[869].

---

[863] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Général de Division Debeney commandant la Ire Armée à Monsieur le Maréchal de France. Signé : illisible.

[864] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 3 mars 1919.

[865] Archives, Washington DC, cote RG120 NM-91-915 B93-94. From Division Gas Officer to Chief of Chemical Warfare Service. Artillery Gas Attacks – American Army.February 5, 1919.

[866] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte Rendu d'une inspection faite le 21 et 22 janvier par le Chef d'escadron inspecteur de la récupération. GQG, le 23 janvier 1919.

[867] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82.

[868] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402 et 121 AL 408.

[869] © Clément Jean-Pierre / FTV. https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/aisne/le-village-de-levergies-totalement-evacue-pour-le-deminage-d-obus-et-de-munitions-datant-de-la-premiere-guerre-mondiale-2288821.html.

Figure 137 : Dépôt de munitions ex-allemandes « Ammunition Reclamation Depot N° 1 ». Les bâtiments à gauche de la route sont des abris. Mauvages, Meuse, France.12 décembre 1918[870].

Les usines et leurs abords étaient des caches privilégiées pour les Allemands pour soustraire leurs dépôts au regard de l'aviation de reconnaissance adverse. Il s'agissait aussi possiblement d'espaces et de bâtiments spacieux qui, de par leur valeur industrielle, furent préservés, soustraits aux bombardements français. Les Français n'allaient pas délibérément tirer sur leurs usines occupées et détruire leur propre outil industriel (on pourrait ici faire avec ce « bouclier industriel » une parabole avec le « bouclier humain » pratiqué pour interdire des frappes sur des objectifs militaires occupés par des populations civiles). Ainsi de nombreux dépôts de munitions furent constitués et dissimulés dans des usines. A Boussois-sur- Sambre, à proximité de Maubeuge (département du Nord), par exemple, l'administrateur des *Compagnies réunies des glaces et verres spéciaux du Nord*, découvrit, en reprenant possession de son usine, un encombrant matériel qui, par sa présence, rendait impossible toute relance immédiate de la production de l'usine : pas moins de 120 tonnes de bombes d'aviation lourdes pisciformes dont 20 bombes de 1,2 tonne[871]. Ce chiffre s'éleva à 270 tonnes si on comptabilisait aussi les 27 wagons chargés de bombes stationnés sur les voies desservant l'usine.

D'autres caches, dans des ruines, en forêt, furent aussi délaissées par les Allemands lors de leur retraite (cf. Figure 138). Le Service du déminage de Metz, rattaché à la Direction Générale de la Sécurité Civile de la Gestion des Crises (DGSCGC) évacua ainsi un dépôt de munitions chimiques ex-allemandes dissimulées dans le crassier sidérurgique de Villerupt (département de la Meurthe-et-Moselle).

---

[870] https://catalog.archives.gov/id/24986. Ordnance Salvage activities in Meuse-Argonne sector [1918-1919]. Dickinson College Archives and Special Collections. From the Catalogue of official AEF photographs.

[871] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère du blocus et des régions libérées. Office de la Reconstitution Industrielle des départements victimes de l'invasion. Le Ministre du blocus et des régions libérées à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Enlèvement d'engins abandonnés par l'ennemi. Paris, le [?] novembre 1919.

La présence de ces obus chimiques au sein de l'usine de la Société anonyme d'Auberive à Villerupt est mentionnée par ailleurs dans les archives conservées au Service Historique de la Défense[872]. Nombreux sont dans les archives les écrits relatant la présence de projectiles abandonnés dans les usines, leurs dépendances et leurs abords comme à Val-et-Chatillon dans le département de la Meurthe-et-Moselle « *J'ai l'honneur de vous informer que les Allemands en quittant Val-et-Chatillon ont jeté leurs munitions (obus particulièrement) dans le petit canal et le ruisseau qui bordent l'usine Bechmann (tissage de velours) à Val-et-Chatillon*[873] ». Après inspection par le personnel rattaché au XXIe Corps d'Armée, il s'avère que des munitions étaient aussi présentes au sein des bâtiments de l'usine mais majoritairement « *Dans les caves des cités ouvrières*[874] ». Des projectiles ex-allemands ont aussi été reconnus et documentés dans les archives sur les terrains de la Société des Mines d'Amermont-Dommary à Bouligny (département de la Meuse) et de la Société des Forges et Aciéries du Nord et de l'Est (marque Raty & Cie) à Saulnes (département de la Meurthe-et-Moselle). A Bouligny, les engins étaient cachés dans les abris creusés à l'emplacement de l'ancien stock de minerai, dans les accumulateurs à minerai et dans les bâtiments des machines d'extraction[875]. Des projectiles furent aussi abandonnés dans les usines de fabrication de munitions et d'explosifs des anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine. Ainsi à Bouzonville (département de la Moselle) « *il existe actuellement à la Fabrique d'Explosifs de Bouzonville, un stock, abandonné par l'Armée Allemande, de 50 000 obus défectueux, chargés, des calibres 77 à 210* [876]».

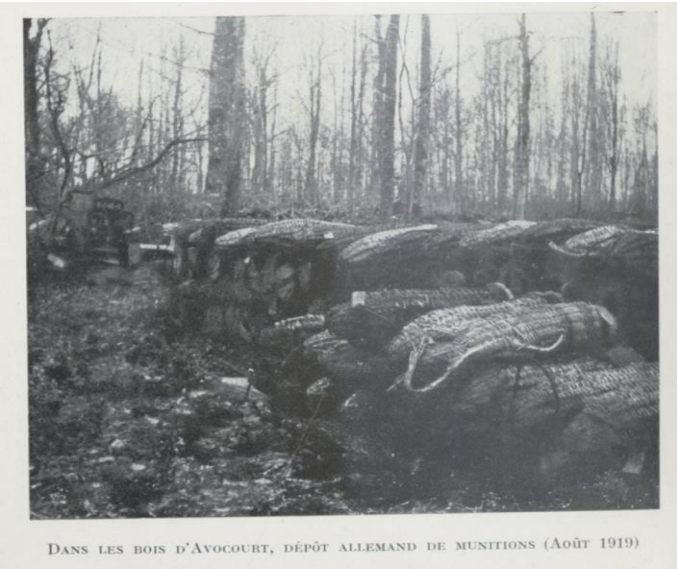


Figure 138 : Dépôt de munitions de gros calibre ex-allemands encore conditionnées dans leurs nasses en osier, abandonné dans les bois à Avocourt, département de la Meuse (cliché d'août 1919)[877].

[872] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Télégramme entré à la D.A. le 27 mars sous le n° 2646. Au GQG, le 29 mars 1919.

[873] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr Bechmann, Filature – tissage et Teinturerie E. Bechmann & Cie à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle du 11 mars 1919.

[874] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du XXIe Corps d'armée, Epinal, le 15 mars 1919 au GQGDA. Signé : illisible.

[875] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Lieutenant-Colonel Taffanel, Secrétaire Général de l'Office pour la Reconstitution Industrielle à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef des Armées Alliées, Direction de l'Arrière, du 6 janvier 1919.

[876] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lettre du Capitaine Forveiller, Commandant le Détachement de Thionville à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle, du 27 janvier 1919.

[877] Bibliothèque nationale de France. *Verdun-Argonne (1914-1918).* 1936.

2.3.6 Convois de munitions délaissés en pleine voie

Des convois entiers de munitions furent abandonnés, immobilisés sur les voies ferrées, en gare. D'autres projectiles jonchèrent les abords des voies, les fossés. « *Il ressort de nombreux compte-rendu que des munitions abandonnées demeurent dans les emprises des chemins de fer ou à proximité immédiate des voies ferrées*[878] ». En effet, ce furent pour le seul territoire de la Ve Armée, 1 200 wagons de munitions ex-allemandes qui restèrent immobilisées en pleine voie[879]. Si on considère que « *La contenance moyenne de 30 wagons était de 20 000 projectiles*[880] », la contenance de ces convois abandonnés devaient s'élever au nombre considérable d'environ 800 000 projectiles. D'après les archives, ces wagons auraient été immobilisés en secteur sous contrôle de l'Armée belge. La libération de ces voies par le déchargement de ces wagons, l'évacuation et la destruction de ces quantités considérables de munitions constitua une réelle difficulté à laquelle fut confrontée le GQG[881].

2.3.7 Munitions précipitées dans les étangs, les fossés et abandonnés sur les bords des routes et chemins

Pour les dissimuler à l'ennemi et peut être aussi espérer les abandonner définitivement, les Allemands précipitèrent de nombreuses munitions dans les rivières, les étangs et les fossés. Une vision exhaustive des quantités abandonnées selon ces modalités à l'échelle du front occidental apparaît non réaliste dans le cadre de cette recherche. Toutefois, des informations locales, mais précises ont été relevées. En 1921, 600 tonnes de munitions ex-allemandes abandonnées ont été extraites du lit de la Vesle dans la Marne, à l'est de Reims. L'étang de La Motte à Liessies (département du Nord) aurait aussi servi de dépotoir, si on s'en tient à certaines images datant du début des années 20 (cf. Figure 140). Le Ministre de la Défense Nationale (Belgique) signala par exemple une situation à risque en lien avec les engins de guerre délaissés « *C'est ainsi notamment qu'à Ledeghem*[882]*, mes services [ndlr : Commission Centrale de la Récupération] ont découvert dans les fossés d'une ferme une quantité considérable de munitions d'autant plus dangereuses qu'elles sont noyées depuis longtemps*[883] ». Lorsqu'il fallut désobuser, les instances en charge de ces opérations prirent pleinement conscience des quantités qui avaient été précipitées dans les cours d'eau « *Des tonnages importants ont été récupérés à la suite des dragages des canaux de la région du Pont-Maudit: canal de la Haute-Deûle, et du Pont d' Avelette: canal d'Aire à La Bassée*[884] » (p.487). Des projectiles parfois organisés en petits dépôts furent abandonnés en l'état par les Allemands au bords des routes et des chemins (cf. Figure 139).

---

[878] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG des Armées Françaises de l'Est du 2 avril 1919. Signé : Major Général Buat.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586[879]. Courrier du GQG du 8 janvier 1919 au Chef de la Mission Belge près du DGCRA. Signé : Renon.

[880] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note au sujet du dépôt de munitions de Spincourt. Ministère de la Guerre. Juillet 1919.

[881] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Maréchal de France Commandant en Chef les Armées françaises à Monsieur le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées alliées. Décembre 1918.

[882] Flandre occidentale, Belgique.

[883]Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Bruxelles, Belgique. Le Ministre de la Défense Nationale à Monsieur le Ministre de l'Intérieur. Bruxelles, le 25 septembre 1922.

[884] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. *Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927*. Septembre 1927. Imprimerie Th.et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. p.487.

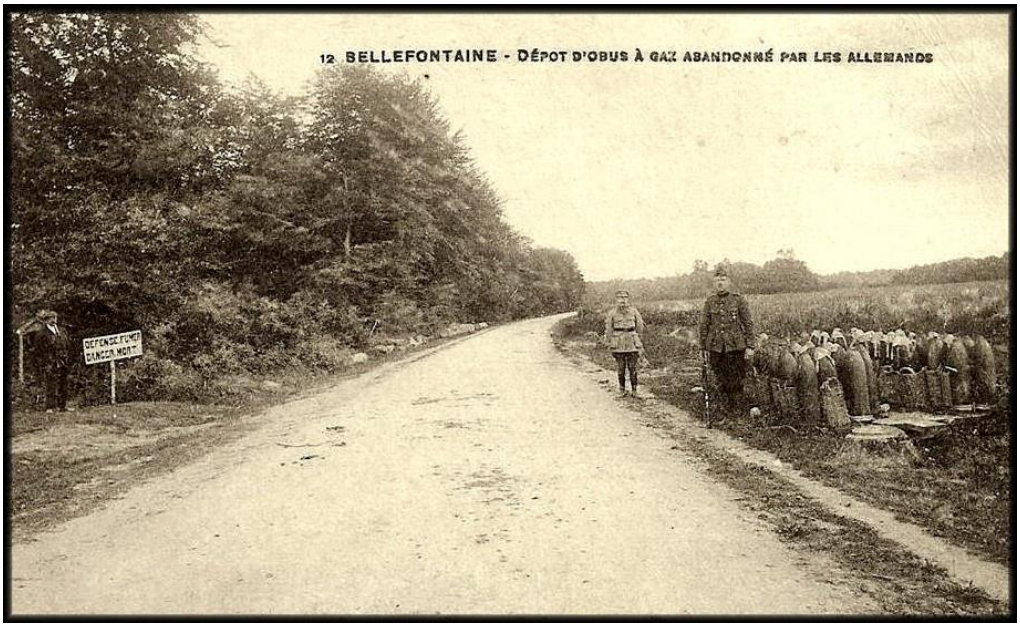


Figure 139: Obus chimiques allemands de gros calibre (possiblement 210 mm) abandonnés par les Allemands au nord d'une route à Bellefontaine (province du Luxembourg, Wallonie, Belgique). A noter que les projectiles sont encore protégés par leurs paniers[885].

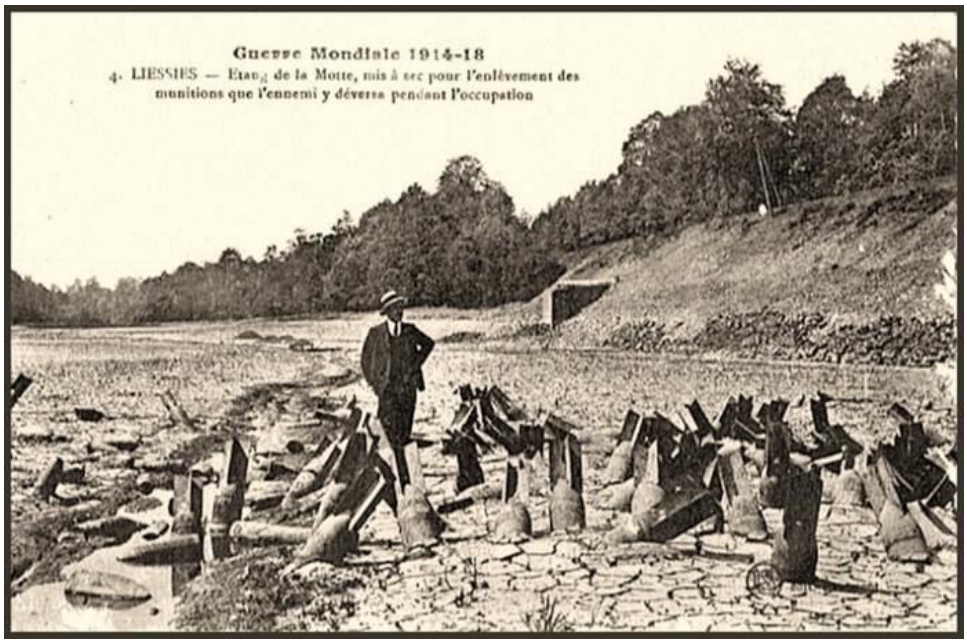


Figure 140 : Carte postale. Un homme bien apprêté, cravate et chapeau, pose fièrement au milieu d'obus et de bombes de tranchées allemandes à ailettes de gros calibre « Flügelminen » de gros calibre plantées dans la boue craquelée de l'étang vidé de La Motte à Liessies, département du Nord. A l'arrière-plan, sur les berges, des amoncèlements de projectiles ont été exondés. Les Allemands ont précipité ces engins dans l'étang lors de la retraite. Ils proviennent possiblement des dépôts de munitions de la Forêt de Trélon. Cet « homme au chapeau » est reconnaissable sur des clichés provenant des chantiers de désobusage de l'entreprise F.N. Pickett & Fils. Un contremaitre en reconnaissance ?[886]

[885] La Guerre de nos Héros. Récits des Hommes pour l'histoire. http://191914-1918.be/2010/05/21/depot-de-munitions-abandonne-par-les-allemands-a-bellefontaine/

[886] Liessies – Guerre de 1914-1918. http://chris59132.canalblog.com/archives/2018/02/26/36178020.html

2.3.8 Quantités abandonnées au terme de la retraite à l'échelle de l'ancien front occidental

Aucun document d'archive n'a été identifié permettant d'évaluer les quantités de munitions réellement abandonnées par les Allemands durant leur retraite à l'échelle du front occidental, mais, au regard des tonnages présents dans les dépôts visés par les destructions des munitions à compter de 1919, et de certaines données chiffrées, locales, collectées dans les archives, ces quantités seraient considérables et de l'ordre d'une ou de plusieurs dizaines voire de plusieurs centaines de millions de projectiles, soit plusieurs dizaines ou centaines de milliers de tonnes de projectiles en tout genre, poudres et matières explosibles.

Les dépôts de munitions jumeaux de Trélon et Liessies dans le département du Nord totalisaient à eux deux en 1920, 25 000 tonnes (tonnage visé par les destruction dans le cadre du contrat du Temps de Guerre du 19 mai 1920)[887], soit selon une autre source 2 000 000 d'engins essentiellement de gros calibre[888]. Celui de Conteville dans la Somme au moins 28 000 tonnes[889]. Les forces expéditionnaires américaines (AEF) rattachées à la IIe Armée des Etats-Unis prirent possession à la fin des hostilités de trois dépôts ex-allemands à Fismes, Mézy et Trugny dans l'actuel département de l'Aisne, renfermant au 20 janvier 1919 respectivement 133, 1 879 et 304 tonnes de projectiles [890].

Une archive, allemande, est particulièrement éclairante sur les ordres de grandeurs des tonnages abandonnés par les troupes du *Kaiser* en retraite. Elle ne concerne qu'un secteur particulier du territoire, celui balayé par la première grande offensive allemande du printemps de 1918. En août 1918, les quantités de munitions abandonnées par les Allemands sur le terrain lors de l'offensive *Michael*, devant faire l'objet d'un rapatriement par les forces allemandes en Allemagne pour y être détruites ou rechargées furent estimées par un industriel du domaine des poudres et explosifs, dans la perspective d'évaluer les besoins pour mener ces opérations.

« *Si toutes les munitions abandonnées sur le terrain lors de la grande offensive allemande de mars 1918 auraient été rapatriées, les quantités suivantes auraient été rassemblées :*

- *60 000 tonnes de munitions chargées de Perdite (munitions d'artillerie de tranchée, mines et grenades à main) ;*
- *30 millions de coups d'artillerie.*

Parmi lesquels auraient dû être déchargées

- *60 000 tonnes de munitions à la Perdite ;*
- *15 millions de coups d'artillerie.*

Le restant des munitions d'artillerie aurait été en partie déchargé et à recharger (en partie supérieure par du Fp.60/40, en dessous Di 65/35, puis en-dessous Di 65/35, et au-dessus du Fp.02 pur [891]».

---

[887] Service Historique de la Défense. 1er Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

[888] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair* Vol. 26 n°329. September, 1921*. F.N. Pickett & Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives. p. 72.*

[889] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN04 7012. Conteville ammunition contract.

[890] National Archives Washington DC, number RG-120 Box n°5.

[891] Bayerische Sprengstofffabrik AG – Fabrik Neumarkt I./OPF. (08/08/1918) : *Abschrift eines Berichtes über eine Besprechung mit Hauptmann Schäfer Wumba A II/2 Berlin am 02/08/1918 über die Errichtung eines Entladewerkes in Neumarkt i/Opf. Bayerische Staatarchiv Abteilung* IV Kriegsarchiv Fzm 5223. Cité dans Preuss, J., Eitelberg, F. (1999) *Hallschalg. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*. Mainzer geographische Studien, Heft 45. Geographisches Institut Der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 1999. p.164.

Ces 15 millions engins remis en état auraient été destinés à servir de munitions d'entraînement. Cette archive sous-entend en creux que 60 000 tonnes de munitions ex-allemandes perchloratées et 30 millions de coups (complets) d'artillerie de campagne et lourde (majoritairement chargés de TNT, nitrate d'ammonium et de dinitrobenzène**)** auraient été abandonnés en 1918 sur le territoire de la Somme et de l'Oise concerné par la première offensive allemande du printemps**.** Aucune archive concernant les tonnages abandonnés lors des deux offensives suivantes en Champagne et en Flandre n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche.

2.4. MUNITIONS INITIALEMENT ABANDONNEES PAR LES FRANÇAIS ET LES ALLIES

2.4.1 Enfouissements et cachettes de projectiles des troupes britanniques

Les Britanniques furent, comme les Français, confrontés aux explosions de dépôts de munitions occasionnés par des bombardements allemands durant les hostilités. Les conséquences de ces explosions catastrophiques furent humaines (avec des morts et des blessés, chez les militaires et les civils comme à Coigneux dans le département de la Somme, le 21 août 1916) mais aussi matérielles avec (i) la perte par détonation de grandes quantités de projectiles (estimation de 500 000 engins au dépôt d'Audruicq (département du Pas-de-Calais) lors du bombardement par « *Taube*[892] » du 21 juillet 1916), (ii) l'ouverture de vastes entonnoirs, rapidement noyés (comme à Audruicq), (iii) des dégâts aux habitations les plus proches des points de détonation, (iiii) la destruction des arbres et des cultures environnants accompagnée par la projection de grandes quantités d'engins endommagés à parfois plus d'un kilomètre des explosions. Ces projectiles rendus instables et constellant les terrains agricoles alentours rendirent l'exploitation des terres et les récoltes aléatoires et dangereuses.

Dans de telles circonstances, la posture des autorités militaires fut celle de privilégier d'une part la prudence et d'autre part le pragmatisme d'une solution permettant d'écarter au plus vite les expositions des personnels civils et militaires aux accidents. Reboucher un cratère d'explosion ouvert par la détonation d'un dépôt par les matériaux, matériels éjectés au-delà des lèvres des cratères fut la solution répondant à ces nécessités « *At Audruicq certain quantities of ammunition were so badly damaged, and were consequently in such a dangerous condition as to render them unsafe for transport by rail. These quantities were carefully removed to a crater which was full of water and dumped. The crater was afterwards filled in with earth and sand, and there is no likelihood that the ammunition will be uncovered as the crater was fully 25 feet*[893] *in depht before being filled in*[894] ». L'explosion du dépôt, les atteintes aux biens et aux personnes résultant de cette détonation, les pertes en matériel et l'exploration de ses causes, ont aussi fait l'objet d'enquêtes par les autorités françaises[895].

---

[892] « Colombe », aéroplane monoplan monomoteur allemand à aile basse.

[893] Environ 7,5 m

[894] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7006. Buried ammunition at Audruicq and Abancourt depots, France. 23th november, 1921.

[894] *Ibid.*

[895] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Au sujet de l'explosion d'Audruicq.

Une situation similaire se reproduisit plus tard, le 21 mai 1918 avec le bombardement puis l'explosion du vaste dépôt britannique de Blargies Moliens (Abancourt) attenant à la gare régulatrice de Romescamps (département de l'Oise). Comme a Audruicq les quantités enfouies ne sont pas connues «*Quantities : unknown, buried at a depth of 12 feet*[896] *in the factory area* [897]» .

A Wanquetin (département du Pas-de-Calais), suite à l'explosion d'un dépôt de munitions, « *les obus spéciaux ont été enterrés*[898] » par les Britanniques pour s'en débarrasser et supprimer les risques d'accidents.

Des enfouissements délibérés furent aussi opérés à des fins tactiques. Ces pratiques de « caches souterraines » débouchèrent parfois à l'abandon non intentionnel des projectiles « *Les Anglais qui, dès le début de la guerre, eurent l'idée que les hostilités dureraient plusieurs années, avaient enterré de véritables stocks de munitions sous terre formant ainsi de véritables « cachettes » appelées « silos » bien garnies. Certains de ces stocks n'ont jamais été utilisés, car le terrain fut pris par l'armée allemande qui ignorait leur existence. Lorsque la guerre fut terminée, l'aspect de la région avait tellement changé par suite des bombardements incessants, qu'aucun soldat ne put arriver à retrouver ces « cachettes* »»[899].

2.4.2 Des dépôts de circonstance alliés abandonnés et/ou devenus subitement inutiles

La reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918, s'accompagna pour les Alliés comme pour les Allemands par un brusque déplacement des lignes de front et des positions jusqu'alors figées, et avec elles un éloignement soudain des unités combattantes de leurs dépôts de munitions installés pour conduire la guerre de siège. Les mouvements des troupes étaient vraisemblablement bien plus rapides que les capacités des forces en présence à déplacer leurs dépôts de munitions majeurs. La guerre de mouvement précipita possiblement l'abandon de matériels, engins de guerre par les Alliés « *Les dépôts sont formés de matériels abandonnés sur place par les parcs [ndlr : d'artillerie] lors de la reprise de l'offensive de 1918, ou lors de la démobilisation*[900] ». Un exemple de dépôt de munitions délaissé en pleine campagne par les troupes françaises était celui signalé au kilomètre 32 de la fameuse ligne de chemin de fer de Dixmude à Furnes (Flandre occidentale, Belgique) par le lieutenant – général Gillain, Chef d'Etat-Major Général de l'Armée belge au général de Division, Chef de la Mission Militaire Française auprès de l'Armée belge, par son courrier du 26 novembre 1918[901]. Il totalisait 4 000 coups complets de canon de 120 mm long[902] et 4 147 coups complets de canon de 95 mm[903] (soit l'équivalent d'environ 110 tonnes). La Figure 141 et la Figure 142 donnent un aperçu photographique de petits dépôts de munitions abandonnés, plus au moins bien organisés (piles bien rangées et amas).

---

[896] Soit environ 3,5 m.

[897] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7006. Buried ammunition at Audruicq and Abancourt depots, *op. cit*.

[898] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7006. Buried ammunition at Audruicq and Abancourt depots, *op. cit*, p.2.

[899] National Archives, Washington DC, number RG 306-NT, box 367. *Echoes of the World War in the « Red zone »*. Photogravure. Picture Section. *The New York Tim*e. Sunday, May 3, 1938. Non signé, *op. cit*.

[900] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. p.2. Ministère de la Guerre. 2e et 13e Régions. Service de l'Artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport particulier fait par M. Gras contrôleur de 2e classe. 5 mai 1921. p.9.

[901] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lieutenant-Général Gillain, Chef d'Etat-Major Général de l'Armée belge au Général de Division, Chef de la Mission Militaire Française auprès de l'Armée belge, courrier du 26 novembre 1918.

[902] D'environ 17 kg / unité.

[903] D'environ 10 kg / unité.

Figure 141 : Dépôt d'obus non tirés, non amorcés (de 150 ou 155 mm) abandonné au bord d'un chemin à Neuville-sous-Margival (département de l'Aisne). A noter à l'arrière-plan deux tombes françaises marquées par la croix de bois. Celle de gauche est ornée d'une bordure improvisée faite de projectiles. Non datée[904].

Figure 142 : Fillette face à un empilement d'obus non tirés (possiblement de 210 mm) abandonnés à Chavignon (département de l'Aisne). Année 1920[905].

[904] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote FRAD002 2 Fi NEUVILLE-SOUS-MARGIVAL 3.

[905] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote FRAD002 2 Fi CHAVIGNON 4.

2.5. ABANDON SOUS TERRE DE MATERIEL DE GUERRE AU TERME DES CONFRONTATIONS CHTONIENNES

2.5.1 Contexte et sources

Des documents d'archives et des constats archéologiques (reconnaissance par des explorations de souterrains) attestent de l'abandon à la fin des hostilités par les unités du Génie, que ce soient allemandes (*Pionniere*) ou françaises, des travaux et galeries souterrains exploités pour la guerre de mines. Il est vraisemblable que les *Tunneller* britanniques en aient fait autant. Ces troupes quittèrent ces systèmes en les abandonnant tels quels ou en prenant soin d'en interdire l'accès en dynamitant les entrées, comblant les galeries de fils de fer barbelés, laissant au fond de ces systèmes de galeries, de grandes quantités d'explosifs en vrac, dans des caisses en bois et des emballages faits de papier paraffiné, des grenades et munitions. Il s'agit de dépôt d'explosifs mais aussi de fourneaux offensifs ou défensifs non explosés, car non actionnés ou dysfonctionnels. Les recherches historiques et archéologiques menées en Argonne dans le cadre de ce doctorat et par Guillaume Jacquinet (alors actif au sein de l'association des « Amis de Vauquois »), missionné par la DRAC Lorraine pour l'étude et la préservation de ces vestiges, fournissent un exemple unique et un aperçu saisissant des quantités et des typologies de matériels explosifs abandonnés et en partie encore présents de nos jours sous terre. Des reconnaissances de ces souterrains ont été réalisées les 19 juin 2019, 24 juillet 2019, 4 février 2020 et le 15 octobre 2021. Ces reconnaissances souterraines furent aussi l'occasion d'échantillonner dans de bonnes conditions de sécurité des fragments de poudres, d'explosifs et les eaux souterraines ennoyant actuellement les systèmes profonds, pour la réalisation d'analyses au laboratoire (cf. Section 1h du présent manuscrit). Ces recherches se focalisèrent sur l'Argonne, un secteur certes, où la tactique de guerre de mine fut déployée à des échelles inédites, mais qui laisse augurer que d'autres secteurs de guerre de mines, peu ou pas explorés, ou dans l'impossibilité de l'être, soient aussi concernés par cette problématique d'abandon souterrain de restes de guerre (comme en Champagne (Massiges, Perthes-les-Hurlus, etc.) en Picardie (Côte 108 à Berry-au-Bac, etc.), dans le Pas-de-Calais (Huluch, etc.) ou encore en Belgique (saillant d'Ypres et crête de Messines). Des observations ont aussi été rapportées concernant le système de mines allemand du Bois des Chevaliers près de Vaux-lès-Palameix à 5 km au sud-ouest des Eparges, sur le flanc nord du saillant de Saint-Mihiel.

2.5.2 Approche archivistique

Dépôts d'explosifs abandonnés

Rares sont les documents décrivant autour de l'armistice de novembre 1918 l'état des systèmes de galeries et souterrains abandonnés par les troupes du Génie allemand. Le rapport manuscrit du 21e Régiment du Génie, Section des projecteurs 115, du 10 novembre 1918[906] concernant l'inventaire du matériel abandonné par les Allemands dans les souterrains de la butte de Vauquois fait état «*Explosifs : il existe un important dépôt dans le fond de la galerie Peter- (mine de gauche), environ 150 caisses de 75 à 80 kg. Plusieurs dépôts moins importants d'explosifs et de grenades dans les autres galeries* ». Le dépôt d'explosif de *Peterstollen* (Vauquois est) (totalisant environ 12 tonnes d'explosifs) n'aurait pas été retiré. Cet écrit ne laisse planer aucun doute sur l'abandon sous terre d'explosifs et d'engins explosifs en quantités.

[906] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 895. 21e Régiment du Génie. Section de Projecteurs 113. 10 novembre 1918.

Fourneaux de mines offensives abandonnés

Les sols des anciennes zones de guerre de mines renferment aussi localement des fourneaux de mines offensives (placés pour ouvrir en surface de vastes entonnoirs), prêts à fonctionner mais abandonnés, comme décrit à la §4 de la Section 4h du présent manuscrit. Willig et al. (2015)[907] décrit l'attaque souterraine britannique majeure sur un large front du Saillant d'Ypres et de la crête de Wytchaete, en Flande occidentale (Belgique) du 7 juin 1917, afin de préparer l'offensive de la bataille de Messines. Sur les 25 fourneaux offensifs, 19 détonèrent comme escomptés. Les autres charges souterraines, totalisant 48 tonnes d'*Ammonal* furent délaissées in situ après la fin des hostilités. L'une d'elle, de 15,4 tonnes, située à une profondeur de 19,8 m, entra en détonation en 1955 suite à un impact de foudre[908], ouvrant un entonnoir de 61 m de diamètre et de 18,3 m de profondeur, causant d'importants dégâts matériels à une ferme, fort heureusement sans faire de victimes.

Camouflets non explosés

La majorité des fourneaux de camouflets détonèrent et fonctionnèrent comme attendu, mais fréquemment, les charges adverses furent actionnées avant les camouflets, sectionnant les dispositifs de mise à feu et causant l'éboulement ou la compression des rameaux de combat y accédant. L'environnement géologique dans lequel ces charges se trouvaient était alors tellement perturbé et désagrégé par les détonations que leur récupération s'avéra rédhibitoire. Les zones d'explosion devenues meubles et finement fracturées, furent contournées par les nouveaux systèmes de galeries des deux parties. Ces charges restèrent ainsi sous terre. Le nombre de fourneaux de camouflets abandonnés in situ sur le front occidental n'est pas connu et reste difficilement quantifiable.

Des indications historiques laissent à penser qu'une charge de camouflet de trois tonnes datant de 1917, qui n'a pas détoné, est encore présente dans les grès à une profondeur d'environ 70 à 75 m (5e niveau du système) sous le col de La Chapelotte. Ces charges françaises étaient fréquemment constituées d'explosifs chloratés (*Cheddite*) ou perchloratés « *En un point reconnu favorable on crée une coupure dans le cheminement avec une petite charge de dynamite, puis en arrière de cette coupure on charge un camouflet de 3 tonnes, c'est tout ce qui reste dans la poudrière après la consommation des jours précédents et l'on n'a pas le temps d'attendre des apports de l'arrière. L'amorçage est préparé et un microphone est laissé dans la charge, de cette manière on entendra le boche et à la moindre velléité de reprise de travail le camouflet lui partira dans les jambes. Ce fut la fin de la Guerre des Mines. Jamais le Boche, sentant la menace qui le guettait, ne s'est avisé de revenir dans ses cheminements*[909] ».

Charges d'autodestruction abandonnées

Les fourneaux de camouflets ne furent pas les seules charges souterraines installées par les sapeurs-mineurs dans un but défensif. Certaines entrées de systèmes de galeries furent équipées de charges d'autodestruction dans le but de les faire s'effondrer, d'interdire l'accès aux souterrains et galeries en cas d'assauts d'infanterie ennemis entrainant la perte de sa position.

---

[907] Willig, D., Rose, E. P.F., Allersmeier, C., Doyle, P. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdients der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*.

[908] Les dispositifs de mise à feu étant électriques.

[909] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 1KT25. Guerre de mines de la Chapelotte. Par le Capitaine Grandidier.

Les sapeurs-mineurs français sécurisèrent de la sorte début mai 1918 le tunnel dénommé « Caudriller » de 800 m de long au Lingekopf (massif vosgien, département du Haut-Rhin) au moyen de 17 charges d'autodestruction (cf. Section 4e du présent manuscrit). Leur dispositif de mise à feu (raccordé au détonateur) était à la fois pyrotechnique et électrique. Le tunnel ne fut pas détruit par explosion, mais fut abandonné après que ses accès aient été comblés. La position exacte de ce tunnel est actuellement inconnue. Les charges « dorment » possiblement encore sous terre dans ce tunnel creusé en juin 1917 pour (i) drainer les eaux (au contact entre le granite et le grès vosgien) et (ii) servir de voie de communication logistique.

2.5.3 Approche archéologique et reconnaissances visuelles

Charges et dépôts souterrains abandonnés d'explosifs en vrac

Des recherches archéologiques menées en Argonne (secteurs de la Haute-Chevauchée, de la Fille-Morte, etc.), à Vauquois et au Bois des Chevaliers ont permis de relever l'existence d'autres dépôts d'explosifs abandonnés sous terre. Plusieurs centaines de kilos d'explosifs allemands de sureté, en pains emballés dans du papier paraffiné comme par exemple, les compositions d'explosifs de sureté nitrés nitratés de *Carbonite*[910], *Donarite*[911] ou *Westfalite* ont ainsi été identifiés et sécurisés (cf. Figure 143). Ces pains d'explosifs ont été découverts dans un état de conservation remarquable.

Des charges d'autodestruction ont par ailleurs aussi observées, abandonnées in-situ dans la gaize d'Argonne, à Vauquois ou encore à la Haute-Chevauchée. Concernant cette dernière, elle était située à l'intersection de deux galeries principales du système allemand et formée par plus d'une centaine de pains d'explosif nitrés nitratés et perchlorate de type *Perdite* de 1 kg, l'ensemble étant encore raccordés à trois câbles électrique en cuivre du dispositif de mise à feu. Les pains étaient rassemblés au nombre de 25 dans des sacs en toile de jute, chaque *Pionniere* en déplaçait deux l'un en face ventrale, le second en face dorsale.

Enfin, en Argonne toujours, secteur Ouest « Corniche », une soute située vers 5 m de profondeur renfermait un tonnage considérable, non estimé, de sacs de toile de jute chargés d'explosifs chloratés français (*Cheddite*). Ces découvertes sont décrites plus en détail dans la Section 4e du présent manuscrit et le chapitre consacré à l'étude sectorielle en Argonne et Vauquois.

Il s'agit d'exemples de découvertes ponctuelles et inopinées. L'occurrence d'autres dépôts souterrains de ce type non identifiés ne fait aucun doute, en Argonne, comme dans d'autres secteurs du front occidental où les rixes dans la lithosphère bouleversèrent les terrains. L'explosif de ces charges est, contrairement aux projectiles et autres grenades, directement au contact de leur environnement, sans barrière, comme celle des parois métalliques.

---

[910] Explosif allemand de sureté antigrisouteux produit en Allemagne depuis 1885. Composition : nitroglycérine 25 35%, sciure de bois 35 - 40%, nitrate de potassium ou de sodium 25 - 35% (Haas et al., 1996).

[911] Explosif allemand de mines et carrières, pulvérulent, explosifs au « salpêtre d'ammonium ». Composition : 55-84% nitrate d'ammonium avec jusqu'à 22% de nitroglycol et 11-16% de trinitrotoluène et dinitrotoluène (Haas et al., 1996).

Abandons de munitions sous terre dans les abris profonds

La guerre souterraine, la guerre de mines, fut une tactique interarmes visant à détruire et défaire des nids de résistance adverses et de préparer, soutenir les assauts d'infanterie en surface avant 1917[912]. Les systèmes de mines, faits de galeries d'attaque, d'accès, d'écoute, de puits et descenderies étaient aussi dotés d'abris souterrains, de casernements pour la troupe, à l'abris des balles et des bombardements. Les abris les plus profonds se distinguent de ceux plus superficiels par leur haut potentiel de protection du fait de la présence entre la surface bombardée et ces abris d'une puissante couverture de sol et/ou de roche. Par ailleurs, d'autres chambres souterraines furent creusées pour abriter infirmeries et hôpitaux de campagne, des groupes électrogènes thermiques (pour l'éclairage, l'aération, les pompes, etc.) mais aussi des dépôts de munitions, notamment celles utilisées pour le combat rapproché dans la guerre de position (grenades, pétards, bombes de tranchées (de *Minenwerfer* par exemple)). Nombreuses sont les munitions d'artillerie d'infanterie et d'armes portatives découvertes sous terres dans les galeries de combat en Argonne.

Ces systèmes profonds n'ont été que partiellement explorés car en effet leurs parties les plus basses sont généralement ennoyées par les eaux souterraines suite à l'arrêt, lors de l'abandon des lieux, des pompages d'exhaure pratiqués par les sapeurs mineurs lors des travaux de creusement pour maintenir les chantiers au sec. La présence de munitions et/ou d'explosifs en vrac au sein même des eaux souterraines paraît donc vraisemblable.

Ces découvertes d'engins abandonnés sous terre sont elles aussi décrites plus en détail dans la Section 4e du présent manuscrit et le chapitre consacré à l'étude sectorielle en Argonne et à Vauquois.

[912] Willig, D., Rose, E. P.F., Allersmeier, C., Doyle, P. (2015). *Schriftenreihe. Geoinformationsdients der Bundeswehr. Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiseführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Heft 4*, *op. cit*.

Figure 143 : Caisses en bois renfermant des pains d'explosifs de sureté allemands de 1 kilogramme de Westfalite et Carbonite emballés dans des papiers paraffinés découverts dans un système de galerie de mine au Bois des Chevaliers (département de la Meuse)[913].

[913]Collection particulière, Guillaume Jacquinet. Communication personnelle.

3. Loin du front. Les surplus de guerre

3.1. GEOGRAPHIE

A l'arrière des lignes de front, dans les zones des armées et au-delà, structurés autour d'un lacis de voies ferrées, étaient organisés tous les dépôts réguliers garantissant durant le conflit l'approvisionnement logistique des unités combattantes au front et des batteries d'artillerie. Il s'agissait, sur la chaîne d'approvisionnement, démarrant des usines de production et ateliers de chargement et débouchant sur les dépôts de munitions avancés des zones des Etapes, proches du front, des dépôts de munitions intermédiaires eux-mêmes alimentés par les vastes dépôts des Etablissements de Réserves Générales de Munitions (ERGMu) (pour l'Artillerie et la Marine française), les dépôts de base (dans le Cher, le département de Côte d'Or, en Haute-Marne, etc.), les stocks en attente d'expédition vers les armées et les dépôts en dormance dans les ports (pour les corps expéditionnaires alliés) et les dépôts des terrains d'exercice. Parmi les ERGMu citons La Ferté-Hauterive (département de l'Allier), Brienne-le-Chateau (département de l'Aube), Miramas (département des Bouches-du-Rhône), Salbris (département du Loir-et-Cher), Chemilly (département de l'Yonne), Mézidon-Canon (pour la marine, département du Calvados).

Des stocks furent aussi constitués sur ou à proximité immédiate des usines de chargement de munitions (pour les Français). Tous ces dépôts étaient bien organisés, gardés, avec des conditions d'entreposage ad hoc contrairement aux REG des anciennes lignes de front où les munitions tirées ou non, étaient éparses et dispersées ou entassées en amas ou en petits dépôts plus au moins bien organisés et exposés aux intempéries.

3.2. DEFINITION ET TYPOLOGIE

Les surplus rassemblaient un ensemble de matériels en état de fonctionnement, immédiatement disponibles pour leur utilisation ou après réfection ou rénovation (*retro-fitting*), mais qui, compte tenu des circonstances de l'arrêt des hostilités, se retrouvèrent excédentaires (*In excess*) par rapport aux besoins qualitatifs et quantitatifs des armées du moment. Sont exclus de ces surplus les munitions réservées pour les exercices de tir et manœuvres. Ces matériels pouvaient par ailleurs devenir obsolètes voire hors d'usage du fait (i) de la détérioration avec le temps des chargements et autres éléments constitutifs des munitions (comme les fusées d'artillerie) entreposées, (ii) des évolutions des besoins tactiques de l'Artillerie, (iii) du déclassement de certaines catégories de projectiles du fait du renforcement des réglementations nationales et/ou internationales concernant leur production, leur circulation et/ou leurs usages. Les surplus sans utilité sont regroupés sous les termes génériques anglo-saxon *In Excess, Obsolete, Unserviceable Ammunition* (munitions en excès, obsolète, hors service) (EOUA).

Ces surplus appartenaient à toutes les parties engagées dans le conflit sur le front occidental : français, britanniques, américains et allemands. Les stocks de munitions allemands renfermaient aussi des projectiles « exotiques » notamment russes acheminés sur le front ouest par les Allemands depuis l'ancien front oriental. Ces surplus présentaient a priori une typologie caractéristique des munitions de la fin de la Première Guerre mondiale compte tenu du flux tendu entre la production des engins et leur consommation par l'Artillerie. Comme cela a été démontré dans ce qui précède, les munitions et leur chargement ne cessèrent d'évoluer entre 1914 et 1918.

Ainsi la typologie des munitions, matières explosibles, entreposés dans les stocks des surplus au moment de la cessation des hostilités était singulièrement différente de celle du début de la guerre du fait de (i) l'augmentation des dotations des arsenaux en projectiles d'artillerie lourdes, (ii) la démultiplication des calibres et la diversification de la nature des chargements, avec notamment un accroissement significatif du nombre de projectiles chimiques, notamment suffocants et vésicants (*Ypérite*, etc.). La présente recherche démontre aussi au fur et à mesure du déroulement de la guerre une dégradation de la qualité des chargements des munitions de tranchées allemandes et des alliages formant les fusées d'artillerie allemandes. Les munitions et explosifs perchlorates étaient aussi présents à la fin de la guerre dans les arsenaux allemands. Cette typologie vaut aussi pour les autres dépôts constitués sur toute la chaîne d'alimentation.

3.3. GENESE ET ORIGINE

Les Français et leurs alliés ne projetèrent pas de capitulation allemande avant la fin du premier semestre 1919. Quelques jours avant l'armistice du 11 novembre 1918, un commandant d'Armée français disait à un homme politique « *Nous allons nous installer pour un hiver de plus* ». En 1914, les Français avaient été mis en déroute près de Sarrebourg. En 1918, Foch imagina y frapper fort en préparant une grande offensive finale et décisive au printemps 1919 afin de déporter la guerre sur le sol allemand et détruire l'armée allemande pour annihiler toute possibilité de nouvelle agression de l'Allemagne à l'encontre de la France. L'*Endkampf* imaginé côté allemand par Ludendorff était aussi dans l'agenda des Français. Foch commença à rassembler du matériel en Lorraine. L'usage massif de projectiles chimiques pour soutenir cette offensive était aussi planifié. Les Français imaginaient poursuivre la guerre en 1919 et dépoter la guerre sur le sol allemand. Aussi, l'effondrement si rapide et inattendu de la résistance et de la combativité de l'Armée allemande à l'automne 1918 surprit le commandement allié. Les Alliés maintinrent leurs efforts et leur puissance de feu jusqu'au bout, car bien qu'étonnés par la subite retraite allemande, ils redoutaient toujours une possible contre-offensive de l'ennemi, les Alliés ignoraient en effet tout de l'état matériel et psychologique de l'Armée allemande et de ses capacités à se battre. Dans ce contexte, les approvisionnements en munitions par les arrières mais aussi par ceux, locaux, en appoint, issus des ramassages / de la récupération aux abords des champs de bataille, ne cessèrent pour maintenir la pression militaire exercée sur l'Allemagne, jusqu'au coup de clairon du 11 novembre 1918.

Durant la Première Guerre mondiale, la Grande-Bretagne, la France comme l'Allemagne, et en moindre mesures les Etats-Unis, eurent à produire un important effort industriel pour subvenir aux besoins quantitatifs et qualitatifs en munitions, poudres, explosifs des Armées en campagne. La cessation des hostilités sur le front occidental du 11 novembre 1918 surprit par sa soudaineté inattendue les Etats-Majors alliés, mais aussi l'industrie en pleine capacité de production, et non préparée à un si rapide coup d'arrêt. « *The abruptness with which the Armistice came found […] still in the phase of preparing for war. Enormous expeditures had been made for production of materials to accompany an army a large part of which never sailed for Europe*[914] » Les Américains qui débarquèrent en 1918 de plus en plus d'hommes et de matériels projetèrent aussi d'accroître leurs approvisionnements en munitions selon une progression linéaire jusqu'en juin 1919.

[914] Problem of Liquidating Surplus War Supplies. Need for Congressional Legislation on War Surpluses (https://library.cqpress.com/cqresearcher/document.php?id=cqresrre1943113000).

Les prévisions d'approvisionnement en munitions de l'AEF étaient calquées sur ce calendrier de la fin des hostilités : énormes et croissantes jusqu'en juin 1919. 250 000 tonnes de munitions étaient encore livrables en France en juin 1919 (soit en moyenne 8 000 tonnes jour) depuis les Etats-Unis pour les besoins de l'AEF (cf. Figure 144 ci-dessous).

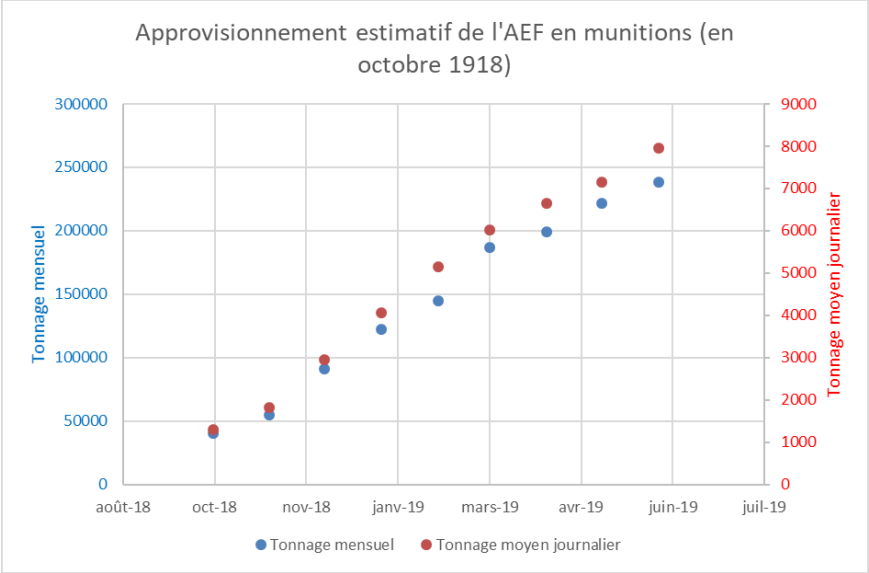


Figure 144 : Prévisions des approvisionnement de l'AEF en munitions (au 8 octobre 1918) [915].

La production industrielle et les approvisionnements des Armées poursuivaient donc un rythme soutenu du temps de guerre lorsque soudain, suite à l'accélération drastiques du tempo des pourparlers pour la cessation des hostilités, les combats stoppèrent. La fin inattendue des combats rendirent instantanément les énormes tonnages des dépôts de munitions et des usines totalement dysproportionnés au regard des besoins militaires réels de la fin des hostilités *« Unused stockpiles of equipment and supplies had accumulated in volume far out of proportion to the actual need*[916] *»*.

[915] D'après les données National Archives, Washington DC, number RG-120 NM-91-2010 Box n°2.

[916] Problem of Liquidating Surplus War Supplies. Need for Congressional Legislation on War Surpluses, *op. cit*.

4. Surplus ex-allemands des anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (*Reichsland Elsass-Lothringen*).

4.1. MAINMISE FRANÇAISE SUR LES SURPLUS EX-ALLEMANDS

Les conditions effectives de retrait des troupes allemandes du territoire d'Alsace-Lorraine (ex *Reichsland Elsass-Lothringen*, devenu au moment de l'armistice le Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL)) et de leur matériel militaire n'est pas documenté au regard du corpus d'archives consulté dans le cadre de la présente recherche. Toutefois, il apparaît que les Allemands délaissèrent en Alsace-Lorraine leurs installations militaires comme l'usine et le stock de munitions du MA3 (pour *Munitionsanstallt n°3*) à Illkirch (au sud de Strasbourg), les dépôts de munitions et leurs forts (*Festen*) de la *Mosellstellung*, de la ceinture de Strasbourg, de Neuf-Brisach et le fort de Mützig.

Le cas des dépôts ex-allemands présents à l'armistice sur le territoire anciennement annexé d'Alsace-Lorraine est singulier car on ne peut parler d'abandon par les Allemands de leurs matériels inutilisés, et donc de les qualifier de Restes Explosifs de Guerre, mais de cession à la France des surplus ex-allemands conformément aux clauses de l'armistice. Ces munitions auraient été de toute façon abandonnées par les Allemands car les conditions dans lesquelles s'effectua le départ des troupes allemandes n'autorisaient aucune évacuation ordonnée et efficace de matériels lourds et des dépôts de munitions qui avaient été installés durant la guerre. Les troupes françaises entrèrent en effet en Alsace-Lorraine environ une semaine après la cessation des hostilités et prirent possession des matériels et installations militaires ex-allemandes laissés intacts.

L'armistice du 11 novembre 1918 octroyait un délai de 31 jours à l'armée allemande pour se retirer de la rive gauche du Rhin et selon le point II de l'armistice l'« *Évacuation immédiate des pays envahis : […] l'Alsace-Lorraine, réglée de manière à être réalisée dans un délai de 15 jours à dater de la signature de l'armistice. L'occupation par l'ensemble des troupes alliées et des États-Unis suivra, dans ces pays, la marche de l'évacuation* ». Mais les troupes françaises, impatientes de reprendre pied en Alsace-Lorraine ne laissèrent dans l'absolu que quatre jours entre leur entrée sur ce territoire et le départ des derniers Allemands. Par ailleurs l'armistice imposait aux Allemands d'abandonner leurs installations et matériels militaires intacts (selon le point VI « *Il ne sera fait aucune destruction d'aucune sorte. Les installations militaires de toute nature seront livrées intactes, de même les approvisionnements militaires : vivres, munitions, équipements, qui n'auront pas été emportés dans les délais d'évacuation fixés* »). Les forts et leurs pièces d'artillerie étaient aussi en parfait état de fonctionnement car, dès septembre 1918, l'Armée allemande engagea un repli stratégique préfigurant la retraite de l'automne 1918 et renforça dans ce contexte ses lignes de défenses sur les positions arrières, notamment en Alsace-Lorraine pour sécuriser leurs frontières de 1870. Le Premier Quartier – Maître Général des Armées Allemandes, Erich Ludendorff écrivit en 1919 dans ses mémoires, à ce sujet « *Les fortifications d'Alsace-Lorraine furent mises en état*[917] ». Les Français s'emparèrent en novembre 1918 ainsi de tous les matériels de guerre ex-allemands abandonnés et en parfait état de fonctionnement.

[917] Général Ludendorff (1932) Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenirs de guerre, Tome II, op. cit*. p.321.

4.2. UN TERRITOIRE CONCERNE PAR DEUX PROBLEMATIQUES GEOGRAPHIQUEMENT DISTINCTES

Le TAL, qui retourna à la cessation des hostilités sous le giron français, fut doublement concerné par les munitions abandonnées, avec deux problématiques distinctes et géographiquement dissociées. Il s'agissait d'abord des grandes quantités de matériels et de munitions laissés en l'état par les Allemands lors de leur départ, dans des dépôts essentiellement localisés en Moselle, et en Alsace dans la plaine et les vallées et certains cols vosgiens.

Puis, des munitions non tirées furent elles aussi délaissées en petits dépôts avancés ou dans les tranchées sur certains secteurs des hauteurs du massif des Vosges qui furent le théâtre durant la guerre, notamment en 1915 (cf. Section 4e du présent manuscrit), de violents combats et duels d'artillerie, comme à l'Hartmannswillerkopf, au Linge, au Reichsackerkopf, à la Tête des Faux, au Violu, etc. Ces engins côtoyaient les REG, ceux des deux camps, constitués par l'ensemble des engins tirés mais non éclatés gisant sur les sols ou s'étant enfoncé dans les sols meubles. Le Sundgau, au sud du département du Haut-Rhin, s'individualise par le fait qu'il était concerné par les deux problématiques mais aussi, localement à Ammerzweiler par les explosifs non utilisés ou imbrûlés qui auraient pu persister sous terre après l'abandon des chantiers souterrains de la guerre de mines actifs en 1916. Il s'agit du site de la guerre de mines le plus méridional du front occidental.

4.3. SURPLUS EX-ALLEMANDS ABANDONNES SUR LE TERRITOIRE D'ALSACE LORRAINE

4.3.1 Inventaires des surplus opérés par les Français

Un inventaire très précis des matériels de guerre et munitions ex-allemands délaissés par l'armée impériale sur le territoire anciennement annexé du TAL mais aussi laissé à disposition (« livrées intactes » selon l'Article VI de l'armistice) des Français sur le sol allemand occupé par les Alliés (en rive gauche du Rhin, avec une tête de pont de 30 km en rive droite en Hesse) fut dressé par l'Etat-Major (via les services en charge de la récupération) conformément aux clauses de l'armistice du 11 novembre 1918 (Article IV et Article VI). Il s'agit principalement des matériels stockés dans les garnisons, casernements et arsenaux, ainsi que dans certaines poudreries. La XXe Armée qui occupa la Sarre et la zone frontalière du département de la Moselle, lista ainsi de façon très détaillée les matériels des dépôts de Spicheren, Hombourg-Bas, Saint-Avold, Forbach, Sierck, Gersweiler, Stiring-Wendel, Puttelange, et en Sarre, ceux de la poudrière de Saint-Arnuald, Jagdhans, Saarbrücken[918]. Cet inventaire fait état de plusieurs milliers d'obus de toute nature. Une démarche similaire fut suivie par le QG de la VIIIe Armée en Alsace, avec par exemple les arsenaux d'Haguenau (dont les casernes du 209e, des Dragons et du Parc de Marxenhausen) qui renfermaient alors des milliers d'obus, une dizaine de milliers de grenades et plus de 120 000 cartouches d'obus de 77 mm[919].

Un décompte des bombes d'aviation laissées par les Allemands sur la place de Strasbourg est également disponible dans les archives.

[918] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Inventaire du Matériel d'Artillerie et des Munitions laissées par l'ennemi sur le territoire de la Xe Armée.

[919] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Etat des munitions existant à l'Arsenal d'Haguenau. 5 décembre 1918. Le Général Commandant la VIIIe Armée. Signé : illisible.

Elles se dénombrèrent par milliers [920] :

- Colmarer-Schanze, 191 bombes explosives pisciformes 50 K *Abwurfbomben*, 1 000 bombes de 12 K, 660 grenades d'aviation dites « bombes souris », 180 bombes incendiaires pisciforme de 20K, 32 bombes incendiaires de 10K,
- Musau Schanze 1116 bombes pisciformes de 12K,
- MA3 192 bombes d'exercice de 12K « *Ubungsbombe* »), 184 bombes explosives pisciformes de 12K,
- Poudrière Ganzau : 600 fusées pour grenades d'aviation (lfl Mäuse), 2 400 fusées pour bombes d'aviation de 12 K (*Scharfe Zünder für 12K° Abwurfgeschosse*), 160 fusées pour bombes d'aviation de 50 K (*Scharfe Zünder für 50K° Abwurfgeschosse*), 64 fusée (*scharfe Zünder AZ.16 für Brand und Ubungsbomben*) instantanées pour bombes torpilles de 50K, 176 fusées pour bombes incendiaires pisciformes de 20K (*P.n.W. Brandbomben Zünder*), 220 fusées pour bombes incendiaires de 10 K° et pour bombes d'exercice de 12K°.

Parmi les documents rassemblées formant le corpus archivistique de la présente recherche, provenant de nombreux fonds, civils comme militaires, internationaux comme nationaux aux divers échelons administratifs, ceux conservés aux archives départementales du Bas-Rhin, relatifs aux anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine, apparaissent, sans conteste, comparativement aux autres territoires occupés par les Allemands durant la Grande Guerre, les plus précis et les plus exhaustifs en ce qui concerne les munitions et matériels délaissés par l'ancien occupant. Ces sources sont vraisemblablement le reflet d'une volonté du GQG d'établir un inventaire le plus précis possible des prises de guerre et s'assurer du plein respect par les Allemands des clauses de l'armistice.

4.3.2 Identification et localisation des principaux dépôts de munitions

La localisation exacte, les tonnages des différents dépôts de munitions du TAL et la typologie des engins entreposés ne sont pas explicitement renseignés dans les archives consultées[921]. Une liste des dépôts de munitions présents au début 1919, établie en date du 11 octobre 1921[922] fait état de 32 dépôts en Alsace[923] totalisant 19 000 tonnes et de 17 dépôts mosellans[924] renfermant 14 000 tonnes. Ces dépôts « *avaient été accumulés en vue de la poursuite des opérations de guerre*[925] » possiblement par les deux parties belligérantes. Parmi les 32 dépôts recensés en Alsace, les archives relatent la présence initialement en 1920 de 11 dépôts de munitions françaises parmi lesquels (encore présents en avril 1921) ceux de Schweighausen, Altdorf, Chatenois, Sundhoffen, Pulversheim, Niedermorschwiller et Altkirch.

---

[920] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Etat des dépôts de bombes d'aviation de provenance allemande existant sur la place de Strasbourg. PAR de Strasbourg le 3 mars 1919. Signé Illisible.

[921] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402 et 121 AL 408.

[922] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408.

[923] Sont soulignés les dépôts de la forêt de la Hardt. Soultz (Haut-Rhin). Marxenhausen (est d'Haguenau), Heteren, Geisswasser, Kastenwald, Pulversheim, Sundhoffen, Vieux-Ferrette, Jettingen, Niedermurspach, Wittenheim, La Source, Battenheim, Schlierbach, Bartenheim, Grünhütte, Forteweg, Hartwald, Homburg, Petit Landau, Altkirch, Mertzwiller, Chavannes-sur-l'Etang, Saint-Amarin, Niedermorschwiller, Schweighausen, Col du Donon, Col du Hantz (Rothau). Altdorf, Chatenois, Neubois et Urbeis.

[924] Aumetz, Sarralbe, Bousse, Bois de l'Hôpital, Orly, Bois de Daumont, Amanvilliers, Gorze, Bois de Morsach, Bois de Lorraine, Schopperten, Bois la Dame, divers magasins de la place de Metz, Silvange, Viviers, Saint-Georges et Niderhoff. Cette liste comporte vraisemblablement des erreurs dans l'orthographe des lieux : Bois de Daumont = Bois de Chaumont (Hampont, Hédival / Puttigny). Bois de Morsach = Bois de Morsbach.

[925] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Communiqué de presse du 22 décembre 1921 « Situation des dépôts de munitions dans les trois départements recouvrés » Communiqué de presse du 22 décembre 1921 « Situation des dépôts de munitions dans les trois départements recouvrés » Signé : Hurst.

Ces sept dépôts ne renfermèrent en 1920 que des obus explosifs d'artillerie lourde. Une seconde liste correspond à celle des dépôts évacués en Moselle en 1918 et 1919 « *et non compris dans les travaux dont le maintien provisoire a été demandé par le PAR*[926] *de Metz*[927] » ; elle comprend 31 dépôts (cf. Tableau 24).

Les archives font également mention de dépôts de munitions ex-allemandes à Marange-Silvange, Woippy (actuel département de la Moselle), à Châtenois (forêt de Willerlé, à l'ouest de Sélestat[928]) dans le Bas-Rhin, Wintzenheim / Walbach (Vallée de Munster) dans le Haut-Rhin. Le dépôt de Benwihr (département du Haut-Rhin) « *ne figure pas sur la liste des dépôts du TA. Il s'agit probablement d'un dépôt allemand qui aurait été évacué en 1919 par la IVe Armée* [929]». Si le nombre exact de dépôts de munitions abandonnés ou constitués sur le TAL dans l'immédiat après-guerre n'est ni explicitement renseigné ni connu de façon précise, ces documents rassemblés dans le cadre de cette recherche montrent que ce nombre excède certainement 70 dépôts totalisant environ 35 000 tonnes, en grande majorité d'engins ex-allemands.

Ces dépôts ont été reportés sur la carte de la Figure 145 (sur laquelle sont figurés les emprises des communes sur lesquelles les dépôts ont été identifiés). Un travail d'analyse méticuleuse d'orthophotographies aériennes anciennes a permis de géolocaliser avec précision certains dépôts. Un exemple de ce travail est celui présenté sur la Figure 146 montrant l'emplacement du dépôt de Hampont, à cinq kilomètres environ au nord-est de Château-Salins (département de la Moselle), avec sa voie ferrée desservant, depuis le dépôt, la pièce d'artillerie de marine allemande sur affût fixe « Long Max » de calibre 380 mm ayant bombardé Nancy en 1916.

A l'échelle du TAL et de l'ancien front occidental dans le nord-est de la France, on constate que ces dépôts étaient essentiellement localisés dans la partie ouest du territoire d'Alsace-Lorraine, dans le Pays des Etangs notamment, au plus près des zones de combat de la Lorraine et de l'Alsace. Les territoires d'Alsace et de Moselle constituaient durant le conflit les bases arrières logistiques d'approvisionnement du front des Vosges et de l'est lorrain expliquant l'importance des tonnages des armements et munitions et la forte densité de dépôts d'engins de guerre abandonnés sur ce secteur géographique.

---

[926] Parc d'Artillerie Régional.

[927] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Metz le 3 janvier 1922.

[928] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général de Division de Boissieu, Gouverneur Militaire de Strasbourg, Commandant supérieur du Territoire d'Alsace à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg du 29 octobre 1921.

[929] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire, Commandant le Parc d'Artillerie de Strasbourg à M. le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace – 1re Section. Dépôts de munitions à proximité des voies ferrées. Strasbourg, le 26 juillet 1921.

Dépôts de munitions existant au début 1919, Strasbourg, le 11 octobre 1921.	Liste des dépôts de munitions évacués en 1918 et 1919 et non compris dans les travaux dont le maintien provisoire a été demandé par le PAR de Metz. Metz le 3 janvier 1922.	Dépôts de rassemblement de matériels du génie[930].	Dépôts de rassemblement de matériels et munitions d'artillerie[931].
Bois de Daumont Aumetz Sarralbe Bousse Bois de l'Hôpital Orly Amanvilliers Gorze Bois de Morsach Bois de Lorraine Schopperten Bois la Dame Divers magasins de la place de Metz Silvange Viviers Saint-Georges Niderhoff **Total au début : 14 000 tonnes**	Hampont Azoudange (1) Azoudange (2) Cote de Delme Château-Salins Lorquin Maizières-les-Vic Gondrexange Boulay Saint-Avold Holacourt Lucy Vannecourt Amelecourt Haboudange Morhange Loudrefing Lostroff Bois des Osses Bisping Ibigny Sarreguemines Guinzeling Bois de Grace Fey Marieulles Lezey Vic Champs de mines de Craincourt et de Lemoncourt Champ de mines de Mallaucourt	Delme Hampont Gondrexange	Bois de Daumont Hampont Château-Salins Azoudange Delme Lorquin Maizières Avricourt Dieuze Rechicourt-le-Château

Tableau 24 : Dépôts de munitions abandonnés sur le territoire anciennement annexé de Lorraine inventoriés dans l'immédiate sortie de guerre.

[930] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Instruction sur les services de récupération et reconstitution dans le territoire du Commandement Supérieur de Lorraine. Au GQG, le 23 février 1919. Le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace. Signé : de Maud'Huy.

[931] *Ibid.*

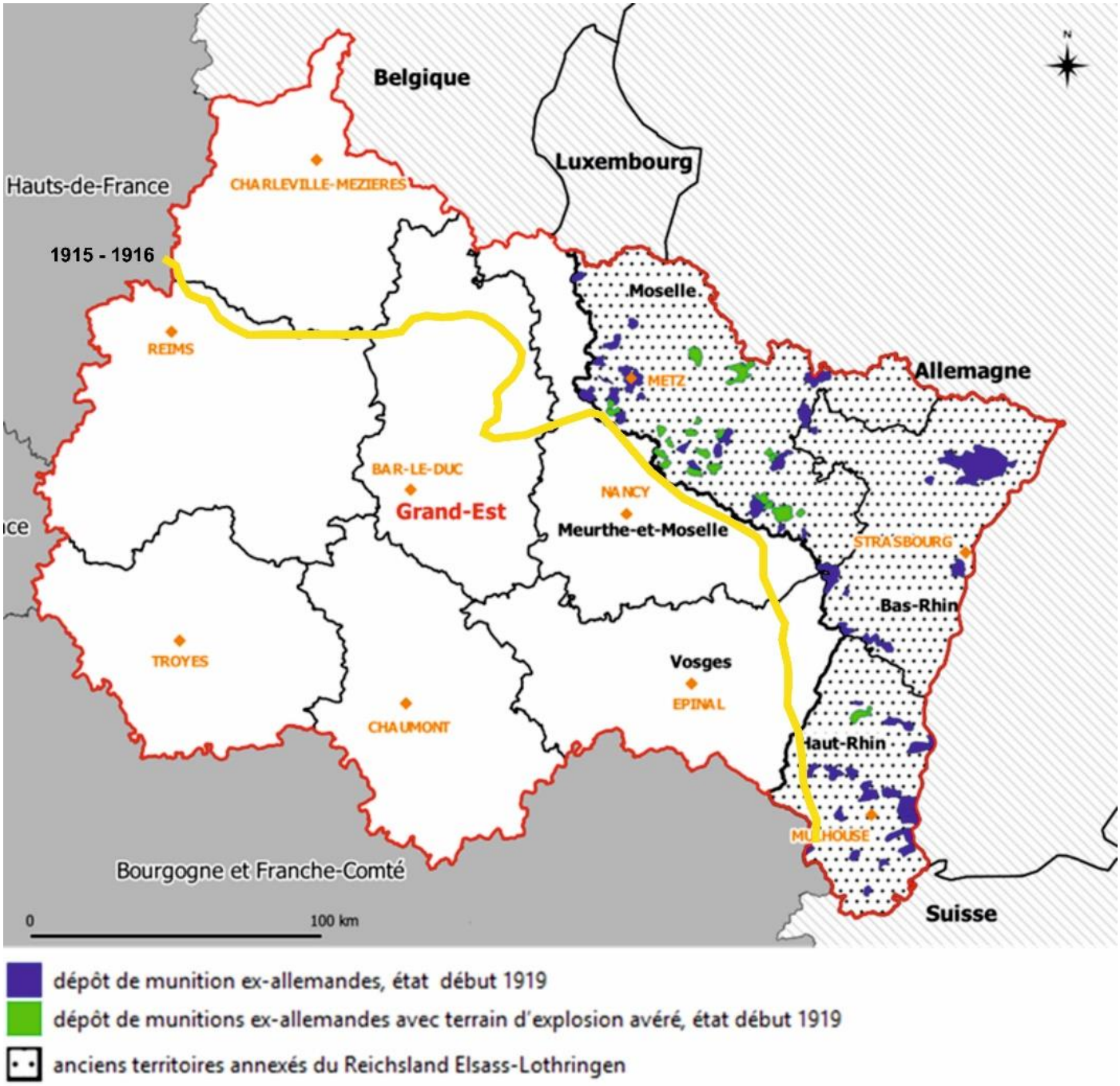


Figure 145 : Distribution des anciens dépôts de munitions ex-allemandes en 1919 en Alsace-Lorraine et tracé de la ligne de front stabilisée (1915-1916)[932].

[932] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408.

Figure 146 : Dépôt de munitions de Hédival Puttigny (département de la Moselle). site du « Gros Max » de Hampont [933].

A noter que les tonnages des dépôts ex-allemands du TAL relevés en 1919 sont significativement plus faibles que ceux présentés par le Sénat en 1922 (cf. Figure 152) faisant état pour le TAL de 44 000 tonnes à détruire et 22 000 tonnes à regrouper. Les causes de cette inflation ne sont pas explicitées dans les archives consultées. On ne peut émettre ici que des hypothèses : déplacement de munitions vers les frontières allemandes entre 1919 et 1922, erreurs et imprécisions des comptages en 1919, rectifiés en 1922 ?

[933] Extrait du cliché IGN F_PVA_1-0__1935-08-23__C3414-0321_1935_NP12R683_7044.

4.4. DESCRIPTIFS ET CONNAISSANCES HISTORIQUES RELATIFS AUX DEPOTS DE MUNITIONS MAJEURS EX-ALLEMANDS DU TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE

4.4.1 Introduction

Quatre dépôts majeurs ex-allemands ont été identifiés, sur la base d'archives correspondant essentiellement à des correspondances entre les autorités militaires locales (commandement des Parcs d'Artillerie Régionaux de Metz et Strasbourg), centrales (Ministère de la Guerre) et les autorités civiles locales (Commissariat Général de la République, etc.) et centrales (Ministère des Régions libérées, etc.) en lien avec les difficultés administratives, socio-politiques et opérationnelles rencontrées pour l'évacuation des dépôts par ailleurs en proie à des accidents (incendies, explosions). Il s'agit du dépôt du Bois de l'Hôpital au sud de Metz (communes de Verny, Crépy) dans le département de la Moselle, le dépôt du Bois de Lorraine entre Keskastel, Schopperten et Sarre-union, à la limite entre les départements de la Moselle et du Bas-Rhin, le dépôt du MA3 en forêt d'Illkirch au sud de Strasbourg (département du Bas-Rhin) et le dépôt du *Hartwaldlager* (forêt de la Hardt, à l'est de Mulhouse, département du Haut-Rhin).

4.4.2 Dépôt de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*) (département du Haut-Rhin)

Le dépôt de la Hardt se distingue des autres dépôts renseigné dans les archives par ses dimensions remarquables. Il s'agissait d'un dépôt, ou plutôt d'une grappe de dépôts, très vaste localisé en forêt de la Hardt à l'est de Mulhouse (département du Haut-Rhin), entre l'agglomération mulhousienne et le Rhin, s'étendant sur une superficie de 7 x 25 km (soit 125 km^2, 17 500 ha). Les munitions étaient dispersées en pleine forêt en cluster d'îlots dans un souci de soustraire les engins aux observations de la reconnaissance aérienne française et d'éviter les explosions en masse en cas de bombardement. Le dépôt de la Hardt était ainsi subdivisé en quatre secteurs, eux-mêmes subdivisés en sous-secteurs indicés de A à D, desservis pour chacun d'entre eux par une gare ferroviaire, et supplées en eau potable pour les combattants et leurs chevaux par des puits. Le sous-dépôt 2 se distinguait par la présence d'un hôpital pour chevaux et un établissement d'épouillage. La capacité d'entreposage du dépôt était énorme ; le tonnage stocké au *Hartwaldlager* n'est pas renseigné ; toutefois, quelques chiffres témoignent des dimensions exceptionnelles du dépôt :

- Dépôt 1A = 103 officiers, 2 850 hommes de troupe, 315 chevaux ;
- Dépôt 1B = 103 officiers, 2 850 hommes de troupe, 315 chevaux ;
- Dépôt 1C = 103 officiers, 2 850 hommes de troupe, 315 chevaux ;
- Dépôt 1D = 70 officiers, 1 256 hommes de troupe, 1192 chevaux ;

Le dépôt 2 (pont Bock) possède une capacité identique à celle du dépôt 1 ;

- Dépôt 3A (Niffer) = 115 officiers, 3 100 hommes de troupe, 838 chevaux ;
- Dépôt 3B (Schlierbach) = 115 officiers, 3 054 hommes de troupe, 330 chevaux ;
- Dépôt 3C (Petit Landau) = 115 officiers, 1 766 hommes de troupe, 1298 chevaux ;
- Dépôt 3D (Kembs) = 115 officiers, 3 268 hommes de troupe, 340 chevaux ;

Quant au dépôt 4, aucune donnée chiffrée n'est disponible. Un terrain d'exercice était positionné au niveau de l'actuel aérodrome d'Habsheim. Des vestiges de ce dépôt sont encore actuellement visible en forêt de la Hardt[934]. Les Figures 147 et 148 permettent de localiser les dépôts et montre l'agencement des stockages de munitions pour chacun des quatre sous-secteurs.

[934] http://sundgaufront.j-ehret.com/hartwaldlager.html

Le dépôt de la Hardt comprenait en tout et pour tout pas moins de 1 600 officiers, 40 000 hommes de troupe et 9 000 chevaux. Le dépôt renfermait des grenades, des projectiles d'artillerie de tranchée (*Minen*). des projectiles d'artillerie de montagne (obus de 75 mm[935]). des « *obus de 77 mm, 105 mm, 150 mm, 155 mm, 210 mm, 240 mm* [936]» et des munitions chimiques (dont des munitions suffocantes et vésicantes à *Croix jaune* et *Croix verte*, et des projectiles émétisants, lacrymogènes et sternutatoires arséniés à *Croix bleue* (au regard du descriptif des munitions détruites sur ce site dans l'entre-deux-guerres).

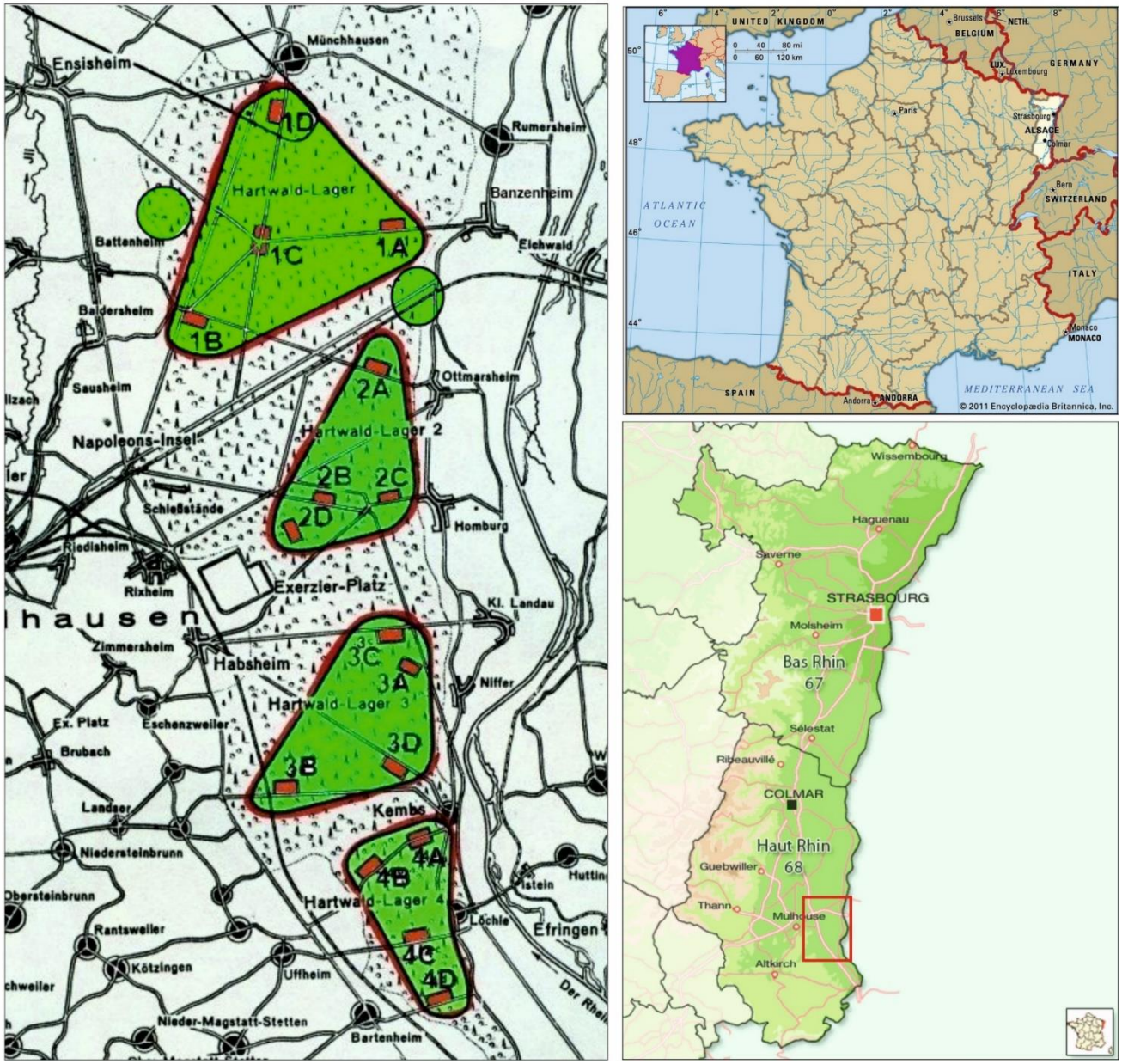


Figure 147 : Localisation et organisation du dépôt de munitions allemand de la forêt de la Hardt (Hartwaldlager)[937].

[935] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Boeglin. Commandant l'Arrondissement de Mulhouse, sur l'explosion d'un obus. 21 mars 1921.

[936] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République, Direction des Affaires militaires. Colmar le 10 novembre 1921.

[937] http://sundgaufront.j-ehret.com/hartwaldlager.html

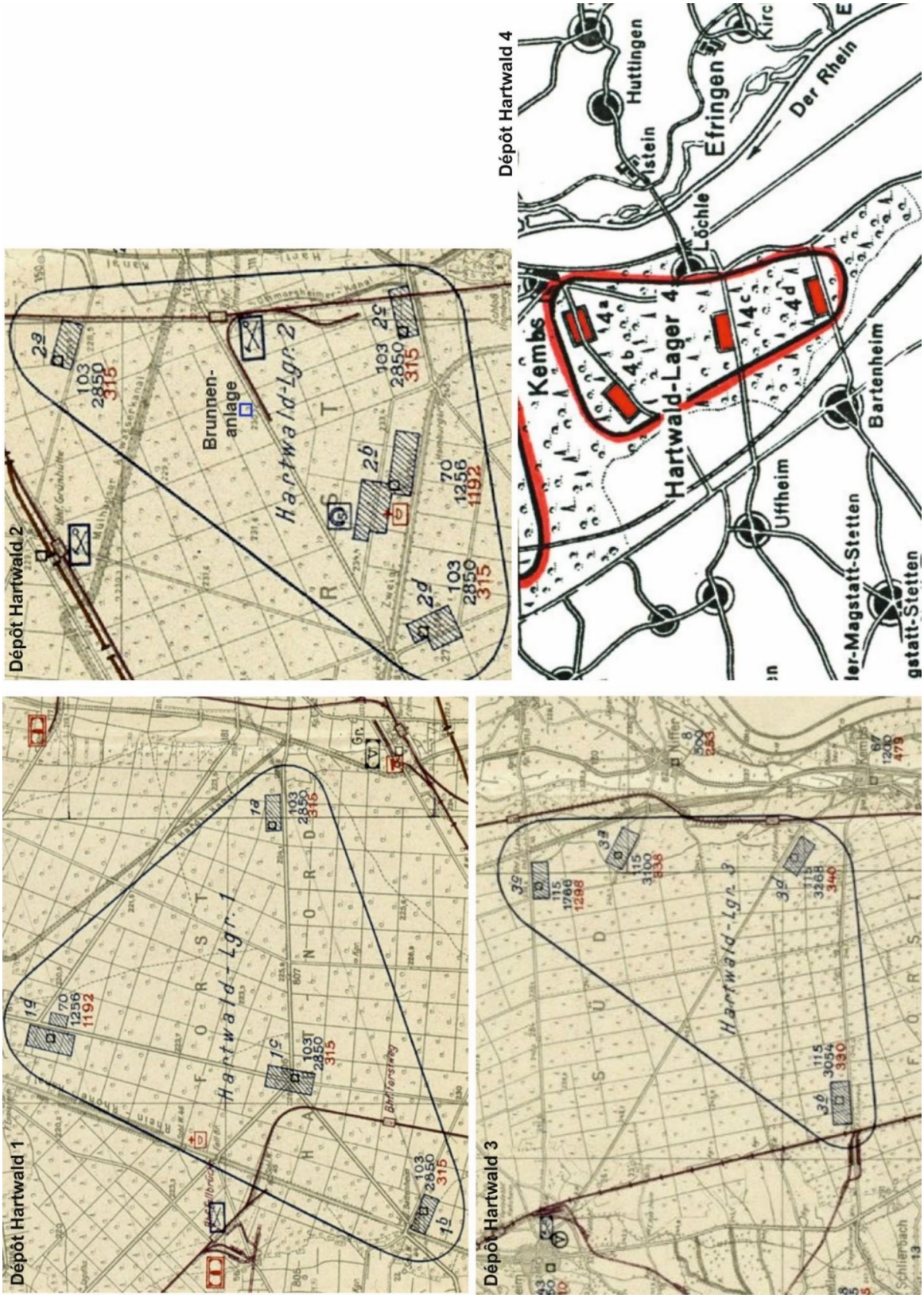


Figure 148 : Organisation des stockages de munitions allemands du dépôt de la forêt de la Hardt (Hartwaldlager) pour chacun des quatre sous-secteurs le constituant[938].

[938] http://sundgaufront.j-ehret.com/hartwaldlager.html

4.4.3 Dépôt du MA3 (*Munitionsanstallt n°3*) à Illkirch (département du Bas-Rhin)

Le MA3 (*Munitionsanstallt n°3,* littéralement « établissements pour munitions n°3 ») situé en forêt d'Illkirch, à 4 km environ au sud de Strasbourg (département du Bas-Rhin) (cf. Figure 149), à proximité du fort Uhrich, était un dépôt de munitions attenant à une usine de fabrication de munitions installée suite à la perquisition de ce terrain de 25 hectares en décembre 1916 par l'autorité militaire allemande (en invoquant les Articles de la loi du 13 juin 1873 sur les prestations de guerre (*Kriegsleistungsgesetz*)). Les tonnages de munitions et la typologie des engins entreposés au MA3 ne sont pas précisés dans les archives consultées. Tout comme le dépôt du Bois de l'Hôpital (dans le département de la Moselle), le site du MA3 fut identifié par l'autorité militaire après 1919 comme un dépôt de rassemblement vers lequel devaient converger des projectiles issus d'autres dépôts avancés de moindre tonnage. Ce site est resté un terrain militaire et un dépôt de munitions durant et postérieurement à la Seconde Guerre mondiale.

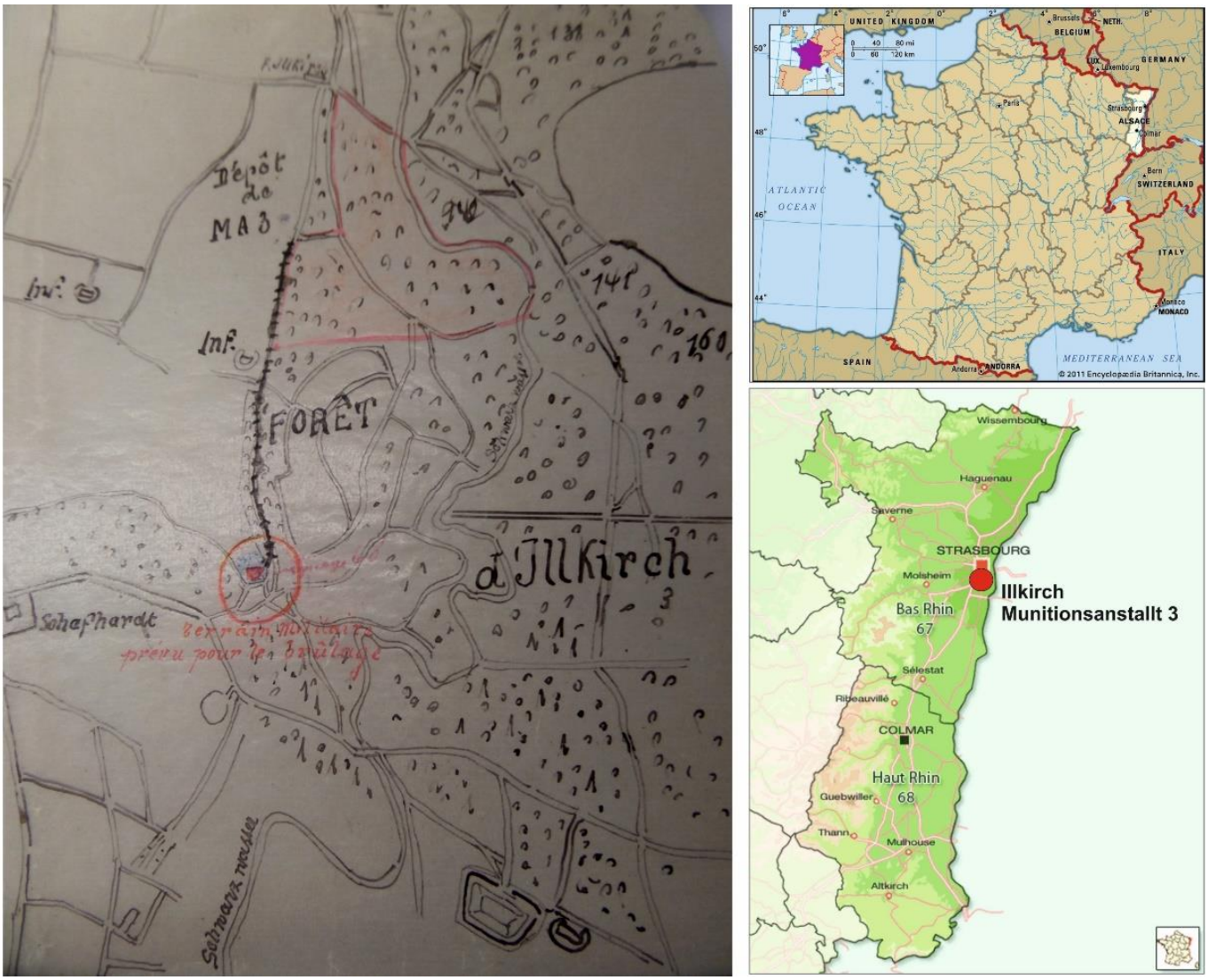


Figure 149 : Localisation du dépôt du MA3 en forêt d'Illkirch (commune d'Illkirch-Graffenstaden, département du Bas-Rhin)[939].

[939] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général Marchal, commandant l'artillerie du XXIe Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République du 5 mai 1922.

4.4.4 Dépôt du Bois de Lorraine (*Lothringer Wald*) (département du Bas-Rhin)

Le dépôt du Bois de Lorraine (actuelle forêt domaniale de Sarre-Union, Alsace Bossue, département du Bas-Rhin, à 3 km environ à l'est-sud-est de Sarralbe), qui s'étendait sur environ 1,2 km d'ouest en est, était organisé en huit îlots (désignés par A, B, C, D, E, F, G et H par l'autorité militaire française en 1921 [940]) implanté de part et d'autre d'une route (chemin forestier du Bois de Lorraine) desservant la maison forestière actuellement située entre la route d'Herbitzheim à l'ouest et l'autoroute A4 à l'est. Le tonnage exact de projectiles contenu dans ce dépôt n'est pas connu ; les archives précisent que ce dépôt aurait aussi renfermé des munitions chimiques[941], des fusées et bombes d'aviation. Les munitions du dépôt du Bois de Lorraine étaient visées dans l'immédiat après-guerre par une évacuation sur le Bois de l'Hôpital. Le site est resté un dépôt de munitions et s'est étendu jusqu'à la fin des années 30 comme en témoigne les orthophotographies aériennes datant de 1929 (cf. Figure 150). Ce dépôt n'est plus visible sur photographie aérienne en 1938.

[940] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Rapport de l'Officier d'Administration, Chef artificier Michel du Parc d'Artillerie Régional de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munitions du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

[941] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier du Préfet du département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) du 22 juillet 1920.

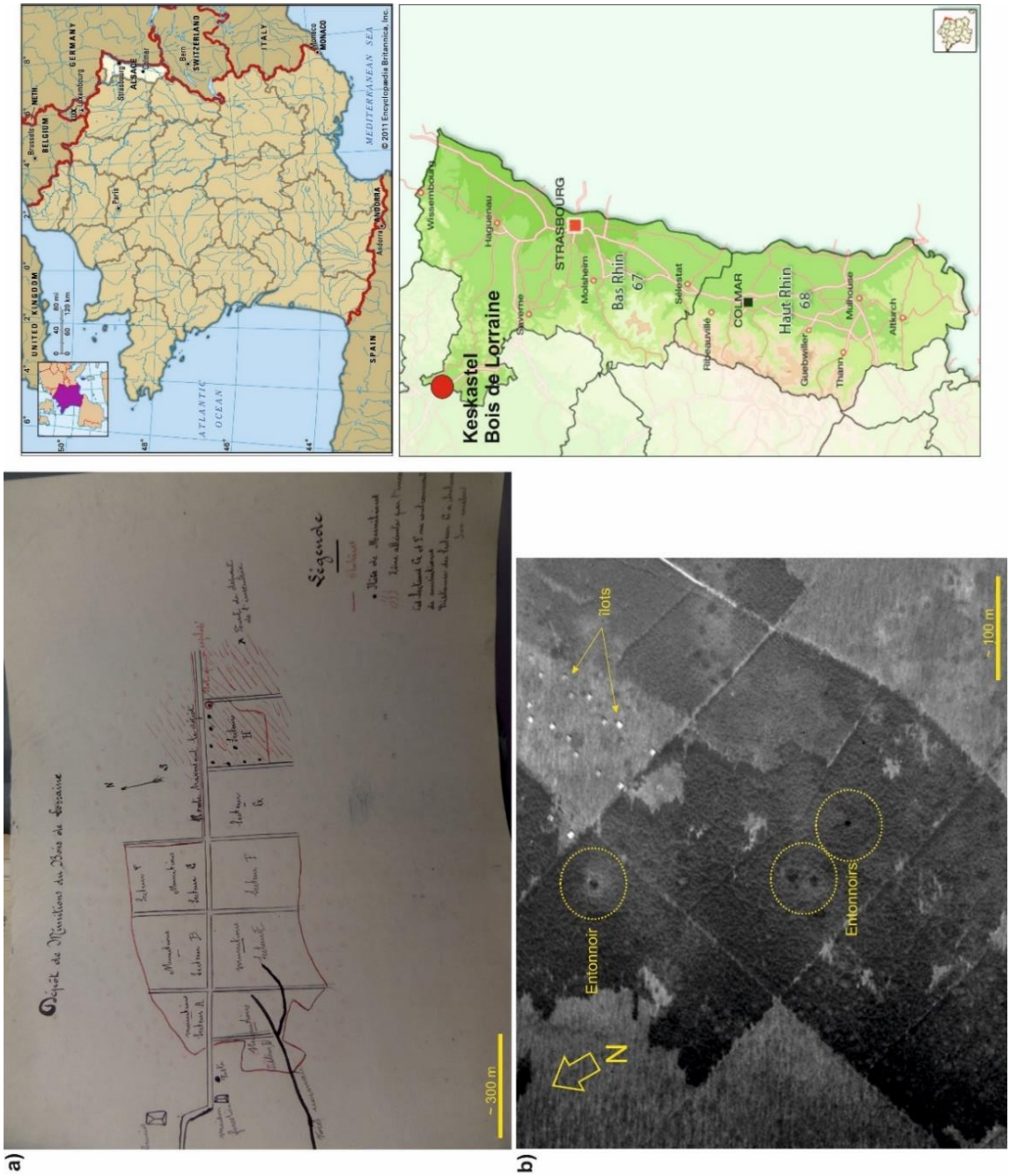


Figure 150 : Le dépôt de munitions du Bois de Lorraine (département du Bas-Rhin) a) état 1921[942] et b) état 1929[943], montrant des îlots de munitions françaises et de vastes entonnoirs ouverts par les explosions accidentelles du début des années 20.

[942] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Rapport de l'Officier d'Administration, Chef artificier Michel du Parc d'Artillerie Régional de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munitions du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

[943] Extrait de Cliché IGN F_PVA_1-0__1929-04-19__C3613-0251_1929_NP2R2_0021.

4.4.5 Dépôt du Bois de l'Hôpital au sud-est de Metz (département de la Moselle)

Le dépôt du Bois de l'Hôpital situé à environ 6 km au sud-sud-est de Metz (département de la Moselle) s'étendait quant à lui sur environ 4 km entre Crépy (commune de Peltre) au nord et Pournoy-la-Grasse au sud, en sept sous-dépôts disposés le long de la route qui sépare la gare de Crépy au Fort Wagner (cf. Figure 151). Ce dépôt, cerné par une ceinture de forts (fort Wagner, fort Léopold, les ouvrages de Chesny Nord et Sud) auraient renfermé à lui seul près de 8 000 tonnes de munitions. La carte (manuscrite sur fond de carte topographique allemande) montre comment ce dépôt était agencé. Figurent par ailleurs sur ce document d'archive[944] les terrains de destruction et l'emplacement prévu par le Ministère de la Guerre pour accueillir en 1922 des munitions françaises. Ce dernier site est resté un important dépôt de munitions jusque dans les années 50 et connut des destructions lors des violents combats qui se déroulèrent dans ce secteur lors de la bataille de Metz (du 27 août au 13 décembre 1944)[945]. Le dépôt du Bois de l'Hôpital fut désigné par l'autorité militaire française dans l'immédiat après-guerre comme dépôt de rassemblement, sur lequel les autres dépôts du territoire de la Moselle devaient converger[946].

[944]Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Parc d'artillerie régional de Metz. Le Lieutenant-Colonel Chardon. Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Commissaire Général de la République (cabinet Alexandre Millerand.) à Strasbourg. 8 avril 1922.

[945] La bataille de Metz opposa la Ire armée allemande du général Knobelsdorff à la IIIe Armée des Etats-Unis (avec à sa tête le général Patton) durant la Seconde Guerre mondiale. La « bataille de Metz » se déroula du 27 août au 13 décembre 1944, et constitua le point d'orgue de la campagne de Lorraine.

[946] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général de Division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz, Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine, Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République, Strasbourg du 6 avril 1920.

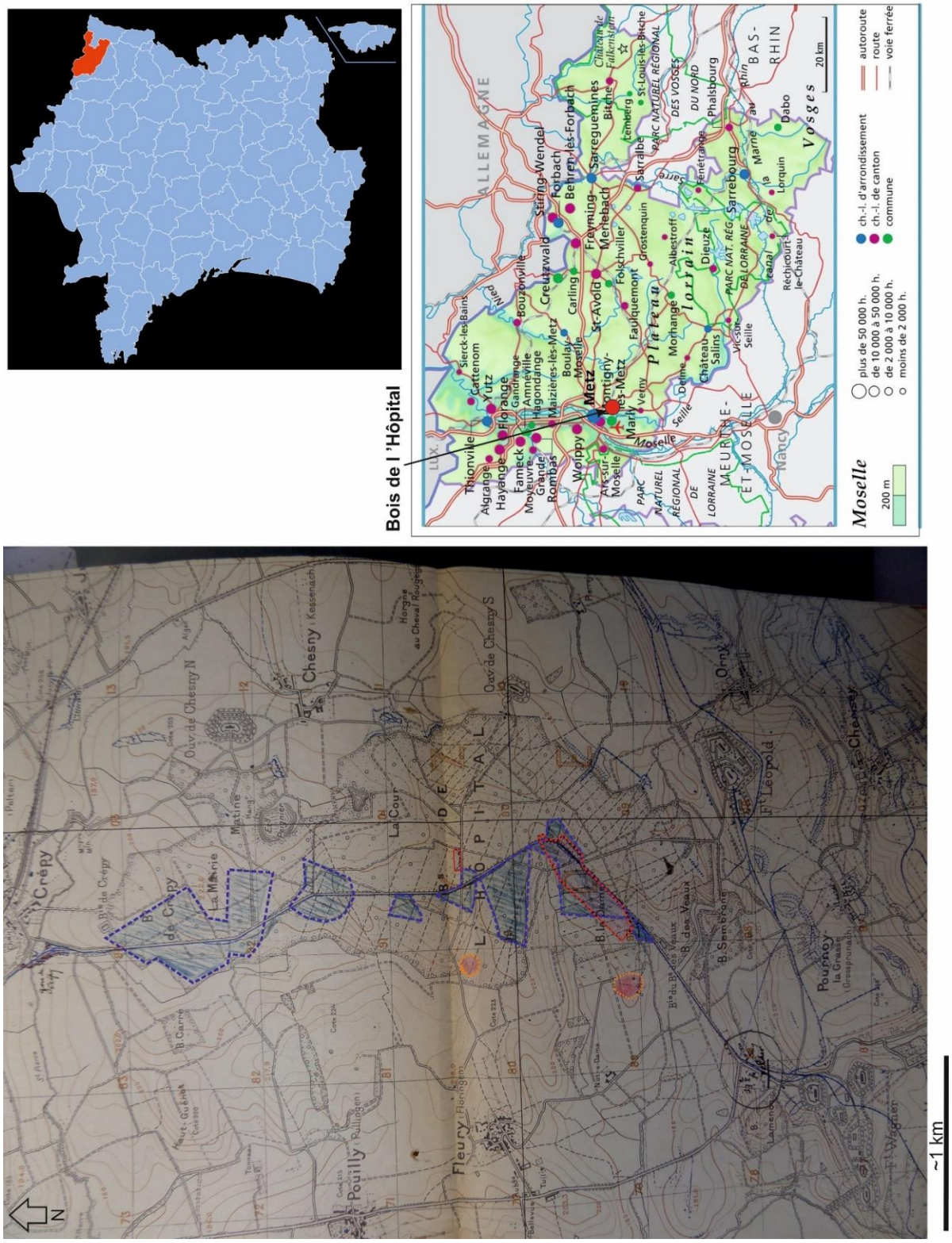


Figure 151 : Dépôt de munitions ex-allemandes (en bleu) du bois de l'hôpital au sud-sud-est de Metz (département de la Moselle). En pointillés rouge, l'emplacement prévu pour un dépôt de munitions françaises. En pointillé orange, l'emplacement de deux terrains d'explosion ; état 1922[947].

[947] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Parc d'artillerie régional de Metz. Le Lieutenant-Colonel Chardon. Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Commissaire Général de la République (cabinet Alexandre Millerand) à Strasbourg. 8 avril 1922.

5. Tonnages des surplus et Restes Explosifs de Guerre. Proposition quantitative et discussion

5.1. TYPOLOGIE DES RESTES DE GUERRE, MUNITIONS EN EXCES, OBSOLETES OU HORS SERVICE. SYNTHESE

Les Armées françaises et celles des alliés britanniques, belges et américains, prirent possession des anciens champs de bataille délaissés par les Allemands mais aussi de ce que plus de quatre ans d'une guerre d'usure, dominée par l'Artillerie, y avait légué. C'est au travers du prisme des vainqueurs que le statut des restes de guerre présents sur ces territoires recouvrés fut analysé puis qualifié dans les archives. Selon ces militaires, ces matériels pouvaient être ventilées en trois catégories (i) les déchets, Restes Explosifs de Guerre, qui d'emblée étaient inertes (comme des munitions déflagrées) ou inutilisables comme les munitions armées, tirées non explosées (UXOs), et (ii) les engins abandonnés par les Allemands, toujours en puissance d'explosion, mais de calibres incompatibles avec ses propres canons, et (iii) les engins Français comme alliés, potentiellement réutilisables, directement, ou indirectement via une éventuelle étape de réfection.

La première catégorie, celles des Restes Explosifs de Guerre, concernait plutôt les anciennes lignes de front et ses abords, dont la densité sur et dans les sols était proportionnelle aux densités des tirs, et concernait aussi une très grande diversité d'engins ou fragments de munitions de toutes les parties qui se battirent sur le front ouest. Ces munitions furent tirées et/ou abandonnées durant toute la durée de la guerre, les opérations de récupération conduite durant le conflit, n'ayant été que partielles et superficielles. Les deux dernières catégories correspondaient plutôt aux surplus de munitions en excès, obsolètes ou hors services des *hinterlands* renfermant des munitions et matières explosibles dont la typologie était celle bien spécifique de la fin de la guerre. Les dépôts de rassemblement constitués par les armées en campagne et les services spéciaux durant la guerre puis lors de la cessation des hostilités étaient situés dans les anciennes zones des Armées renfermaient des matériels, utilisés ou non, de son propre camp ou ex-allemand, d'une grande hétérogénéité.

5.2. SITUATION AU MOMENT DE LA CESSATION DES HOSTILITES

Aucun inventaire des dépôts de munitions françaises et alliées stockées en surplus à l'issue des hostilités n'a été identifié dans le cadre de cette recherche. Des inventaires des dépôts de munitions en surplus furent localement établis aux échelles départementales par les Parcs d'Artillerie dont dépendaient ces territoires, notamment en Meuse, et dans le TAL. Le cas particulier du TAL fait l'objet d'un développement spécifique dans ce qui précède.

En Meuse, on recensait 22 dépôts français renfermant chacun de 60 à 4 000 tonnes (dépôt de Déramé, actuel champ de tir de Rozelier à l'est de Verdun), totalisant environ 26 600 tonnes[948]. Ces recensements portant sur l'origine et les tonnages des surplus étaient destinés aux Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) des différentes régions militaires dans la perspective de l'évacuation de ces dépôts pour être soit détruits, soit regroupés et réorientés vers des dépôts réguliers de l'Artillerie pour être réallotis. Les tonnages des surplus alliés sur le sol français sont bien tracés et sans ambiguïté. Ils s'élèveraient à environ 636 000 tonnes. Comme nous le verrons dans un développement ultérieur du présent manuscrit, les Britanniques prirent le parti de ne pas rapatrier outre-manche leurs munitions entreposées sur le sol de France mais de les démolir sur place (cf. Section 10h du présent manuscrit).

[948] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Dépôts de munitions.

Les tonnages de munitions britanniques visées par ces destructions renseignent donc sur l'importance des surplus britanniques à la cessation des hostilités. Ils s'élevaient à environ 400 000 tonnes entreposés dans de vastes dépôts comme ceux d'Audruicq (département du Pas-de-Calais), de Moliens Abancourt (département de l'Oise), Saigneville et Fressenneville (département de la Somme).

Les surplus de l'*American Expeditionary Force* (AEF) entreposés dans des dépôts de munitions le long de leurs voies ferrées logistiques du centre de la France (parmi lesquels ceux de Jonchery (département de la Haute-Marne), Foëcy (département du Cher) et Sainte-Loubès (département de la Gironde), les plus importants), dans les ports (dont Calais, le Havre et Rouen), dans les centres d'entrainement et d'exercice et dans les zones des Armées, s'élevèrent à environ 236 000 tonnes (cf. Tableau 25 ci-après).

Ports et dépôts. Localisation (département)			Tonnage
Advanced ordnance depot	n°4	Jonchery (52)	55 970
Advanced ordnance depot	n°4	Foëcy (18)	59 620
Advanced ordnance depot	n°5	Issoudun (36)	6 240
Advanced ordnance depot	n°5	Sainte-Loubès (33)	10 250
Advanced ordnance depot	n°1	Ille-sur-Tille (21)	1 860
Advanced ordnance depot	n°1	Gièvres (41)	2 670
Advanced ordnance depot	n°1	Montoir (41)	3 770
Advanced ordnance depot	n°1	Chantenay (44)	6 710
Advanced ordnance depot	n°6	Miramas (13)	150
Advanced ordnance depot	n°7	La Rochelle (17)	120
Advanced ordnance depot	Port	Calais (62)	215
Advanced ordnance depot	Port	Le Havre + Rouen (76)	380
Ports et dépôts			**147 955**
Centres d'entraînement et d'instruction			**9 552**
Dans les zones des armées			**73 790**
En transit dans *SOS (Salvage Ordnance Service)*			**4 530**
TOTAL			**235 827**

Tableau 25 : Surplus de munitions de l'American Expeditionary Force début 1919[949].

Des munitions britanniques furent aussi réservées pour l'Armée du Rhin et le Corps expéditionnaire britannique en Russie (totalisant 43 000 tonnes). Les tonnages des dotations en munitions des corps expéditionnaires américains (opération *Ours polaire* en Sibérie) et français en Russie en 1919 et ceux cédés au titre de l'aide militaire française à la Pologne et à la Tchécoslovaquie n'ont pas été identifiés dans le cadre de cette recherche.

Concernant les surplus français, des données chiffrées relatives aux tonnages des munitions résiduaires héritées de la Grande Guerre présents sur le territoire dans l'entre-deux-guerres ont été identifiées dans un document daté du 14 mars 1922[950] et versé aux archives du Sénat.

[949] National Archives, Washington D.C. Statement of type, quantities and weights of ammunition and square footage required therefore and avalaibilities. Number RG-120 221-471.6 Box n°11

[950] Bibliothèque nationale de France. France. Sénat (1875-1942). Auteur du texte. Impressions : projets, propositions, rapports... / Sénat. 14 mars 1922.

Les tableaux de la Figure 152 constituent un extrait de cette archive. Ils exposent, pour les Régions militaires directement concernées par les évènements de 1914-1918, les tonnages « à regrouper », c'est-à-dire à conserver et à réorienter vers les dépôts réguliers des Parcs d'Artillerie Régionaux (rattachés à chaque région militaire) et « à détruire » en date du 1er février 1922, depuis « le début des opérations ».

Les tonnages de munitions ex-allemandes et françaises présentes sur le territoire d'Alsace-Lorraine ont été intégrés à ces chiffrages. La somme des deux catégories représenterait dans l'absolu les quantités de munitions résiduaires de la Grande Guerre sur le territoire métropolitain au moment de l'engagement des opérations de désobusage et de gestion des munitions résiduaires. Elles s'élèveraient à environ un million de tonnes.

Les 381 900 tonnes à regrouper constituèrent en février 1922 les surplus, les tonnages excédentaires. Les 637 300 tonnes à détruire, destinées à l'abandon en tant que matériel militaire, formèrent l'ensemble des restes et déchets de guerre.

Les tonnages des surplus au moment de la cessation des hostilités restent délicats à chiffrer sur la base de cette archive, ces quantités sont en effet entachées d'une double ambiguïté (i) il n'est pas précisé ici ce qui signifie « le début des opérations », s'il s'agit des opérations de désobusage engagées dès fin 1918 sous autorité militaire ou s'il s'agit des opérations de désobusage contractuelles engagées dès 1920 par le Ministère de la Guerre et le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), (ii) l'origine des munitions n'est pas précisée et en particulier s'il s'agit des surplus initialement présents sur le sol des Régions militaires concernées par la Grande Guerre en novembre 1918 ou s'il s'agit de ces surplus augmentés par les REG issus de la récupération sur et aux abords des anciens champs de bataille entre 1918 et 1922. Enfin, il convient de souligner aussi que les surplus présents dans les ERGMu des régions militaires autres que les 1er, 2e, 6e, 7e, 20e et 21e régions n'ont pas été comptabilisés dans ces tableaux.

Destructions.

(MUNITIONS ÉVALUÉES EN TONNES)

RÉGIONS	TONNAGE à détruire au début des opérations	TONNAGE détruit en janvier.		TONNAGE restant à détruire.	
		par le service de l'artillerie.	par les industriels.	par le service de l'artillerie.	par les industriels.
1re	180.000	398	»	1.600	21.600
2e	240.000	900	»	1.480	29.500
6e	150.000	797	1.400	436	35.500
7e	1.600	»	»	179	»
20e	11.100	3	108	»	8.560
21e	10.600	54	»	»	»
Alsace	23.000	»	896	»	5.100
Lorraine	21.000	»	»	»	4.320
Totaux	637.300	2.152	2.464	3.695	104.580

TABLEAU III

Regroupement.

(MUNITIONS ÉVALUÉES EN TONNES)

RÉGIONS	TONNAGE à regrouper au début des opérations.	TONNAGE regroupé en janvier.		TONNAGE restant à regrouper.	
		sur un dépôt militaire.	sur une usine de démolition.	sur un dépôt militaire.	sur une usine de démolition.
1re	103.000	»	»	»	6.500
2e	60.000	»	»	»	»
6e	116.000	577	»	30	»
7e	9.900	»	»	»	»
20e	56.000	»	»	»	»
21e	15.000	»	»	»	»
Alsace	11.000	»	»	4.400	3.160
Lorraine	11.000	»	(1) 1.435	»	(2) 4.320
Totaux	381.900	577	1.435	4.430	13.980

(1) Expédiées à Kelsterbach. — (2) A expédier à Kelsterbach.

Figure 152 : Munitions à regrouper et à détruire en France en date du 1er février 1922[951].

Les informations collectées dans le cadre de cette recherche ne permettent pas d'établir de façon exhaustive et précise (i) le tonnage total des munitions ex-allemandes abandonnées sur les sols français et belges au terme des hostilités, (ii) le tonnage total des engins de guerre présents sur ces territoires à cet instant, toutes origines confondues et (iii) une cartographie de ces dépôts. Les quantités et tonnages chiffrés sont hétérogènes quant à l'objet visé (engins à regrouper, réserver, détruire), leur origine (allemande, américaine, britannique, non précisé) et asynchrones (état des tonnages selon les postes entre 1919 et 1922).

Certaines informations collectées dans le cadre de cette recherche restent ponctuelles, parcellaires, valables à l'échelle locale, et s'avèrent parfois ambiguës.

[951] Bibliothèque nationale de France. France. Sénat (1875-1942), *op. cit.*

Ainsi d'après Clout (1996)[952], les quantités de munitions détruite dans les 10 départements des régions libérées s'élèveraient en janvier 1920 à 14 000 000 de tonnes, augmentant ensuite deux ans plus tard à 20 800 000 tonnes[953] Ces estimations font certainement la confusion entre le tonnage et le nombre de projectiles détruits. Enfin, ces estimations quantitatives sont indicatives. La manière dont ont été comptabilisés ces tonnages n'est pas précisée dans les archives. Ils résultent vraisemblablement d'un comptage des engins par calibre, multiplié par le poids de chacun d'entre eux.

Bien qu'entaché d'incertitudes, le recueil des quantités de munitions en excès (surplus), permet de donner *in fine* des ordres de grandeur des tonnages présents sur le sol métropolitain au terme de la Première Guerre mondiale. Ils seraient considérables, se chiffrant à au moins 1 700 000 tonnes.

Le contexte historique de l'immédiate sortie de guerre et certains phénomènes affectant les munitions, suggèrent que le tonnage des REG et des surplus d'engins en excès, obsolètes ou hors services s'est vraisemblablement accru dans l'entre-deux-guerres.

5.3. UNE INFLATION DU TONNAGE DE MUNITIONS EN EXCES, OBSOLETES ET HORS SERVICE DANS L'ENTRE-DEUX-GUERRES ?

5.3.1 Le jeu des équilibres. Surplus en France et la démilitarisation de l'Allemagne

La puissance militaire des Alliés devait être maintenue supérieure à celle de l'Allemagne vaincue en particulier durant les mois qui séparèrent la signature de l'armistice du 11 novembre (et ses prolongations : le 13 décembre 1918 pour un mois jusqu'au 17 janvier 1919, prolongé à nouveau pour un mois le 16 janvier 1919, renouvelé du 16 février) et la signature du Traité de Paix de Versailles du 28 juin 1919, afin d'inciter l'Allemagne à démilitariser (cf.§5. de la Section 10h du présent manuscrit) et à se soumettre aux exigences des Alliés (et en particulier de la France) en matière de réparations de guerre. La démilitarisation de l'Allemagne sans retard était d'abord préventive, pour annihiler toute velléité de recommencer, « *Il fallait arracher à l'Allemagne le moment et la tentation de recommencer ; réduire, dans le présent immédiat, son état militaire au minimum compatible la nécessité de sa défense et le maintien de l'ordre*[954] ». Ensuite, il fallait exercer sur l'Allemagne une pression militaire pour la contraindre à accepter les conditions des réparations de guerre (cette menace militaire dans l'armistice renouvelé du 16 février 1919). L'Article 171 du Traité de Versailles interdit l'usage des toxiques de guerre en Allemagne, et l'Article 169 imposa la destruction ou la neutralisation des matériels de guerre excédentaires par rapport aux quotas. La démilitarisation de l'Allemagne était aussi un moyen de réduire la voilure des forces nécessaires, dans le contexte des tensions autour de la question du paiement des réparations de guerre, au maintien d'une supériorité militaire alliée et ainsi d'accélérer, pour les Français, Britanniques, Américains et Belges, la démobilisation des troupes et matériels. « *Plus que personne aussi, il [ndlr : Georges Clémenceau] voulait que les Alliés conservassent, jusqu'à la fin des négociations, un instrument militaire supérieur à celui de l'Allemagne et, pour cela encore, il avait hâte de réduire la force allemande*[955] ».

---

[952] Clout, H. (1996). *After the ruins. Restoring the countryside of northern France after the Great War*. University of Exeter Press. p. 157.

[953] Bibliothèque nationale de France. Ministère des Travaux Publics. Service des Régions Libérées. *La reconstitution de la France dévastée: statistiques générales* (Paris, 1929).

[954] Tardieu, A. (1921). *La Paix*, *op. cit*, p. 137.

[955] *Ibid,* p. 140.

Les clauses du Traité de Versailles entrainèrent la démilitarisation partielle de l'Allemagne et mécaniquement, une réduction des forces alliées à opposer à l'Allemagne pour garantir une supériorité militaire. Cette situation entraina donc inéluctablement une inflation des munitions et engins de guerre excédentaires dans les arsenaux français.

5.3.2 Inflation des surplus et tonnages des Restes Explosifs de Guerre par les opérations de récupération et les travaux de première urgence

Les travaux de désobusage et de remise en état des sols des anciens champs de bataille et de leurs abords, entamés dès les premiers instants de la guerre (cf. Section 7h), étaient d'abord superficiels, mettant à jour de grandes quantités de matériels et munitions gisant, épars, en amas ou en dépôts plus au moins bien organisés. L'Etat engagea à ses frais, dès la cessation des hostilités, d'importants travaux de remise en état des sols, de comblement des tranchées et des cratères d'impact et de déblaiement des ruines notamment, dont l'organisation et la coordination furent confiés à des services spéciaux comme le STPU (Service des Travaux de Première Urgence) (cf. Section 7h du présent manuscrit). Les travaux du STPU contribuèrent à la découverte de grandes quantités de munitions et matériels de guerre abandonnés : projectiles cachés dans la boue, petits dépôts de grenades, de projectiles d'artillerie d'infanterie organisés dans les tranchées, etc. Ce réservoir de projectiles anciens crut ensuite par la mise à l'affleurement, lors de la reprise des labours, des engins enfouis dans les quelques dizaines de centimètres sous la surface du sol. « *D'autres engins furent ensuite remis à l'affleurement à la faveur de la reprise des premiers labours. Dans la suite, au cours des travaux de nivellement du sol, des déblaiements, des travaux de reconstruction, des labours, la présence de nombreux explosifs fut décelée*[956] ». Ces travaux agricoles ainsi que ceux de remise en état des sols, de déblaiement, contribuèrent à l'inflation des tonnages de REG dans l'immédiate sortie de guerre.

Ces matériels, tirés ou non tirés étaient d'une très grande diversité, tant dans leur calibre, que dans leur nationalité (française, britannique, américaines, allemande, austro-hongroise, voire russe), leur chargement et leur état de conservation. Les UXO étaient de conception très diverses, datant de toutes les phases de la Grande Guerre contrairement au surplus de guerre dont les matériels constitutifs dataient de la fin des hostilités.

Une partie de ces tonnages, difficile à estimer, était transportable, sûre, et potentiellement utilisable, directement ou indirectement après réfection. Les tris opérés par les personnels du désobusage sur les lieux de leur découverte les orientèrent vers des dépôts de rassemblement pour leur ré allotissement temporaire ou définitif. Les grands dépôts de munitions et de matériels divers des *hinterlands*, ou encore ceux intermédiaires des zones des Armées, correctement desservis par des voies de communication (voies de chemins de fer, canaux fluviatiles, etc.), restées globalement indemnes de dommages de guerre, et encore gardés, servirent souvent de centres de rassemblement aux engins transportables en aval des opérations de récupération et de tri.

[956] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. *Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927*. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. (pp, 486-487).

5.3.3 Déclassement des munitions chimiques et de l'artillerie de tranchée

Des armes de la guerre de position d'antan qui n'ont plus raison d'être dans les guerres de mouvement modernes ?

Les combats de l'année 1918 préfigurèrent ce que pouvait être à l'avenir une guerre de mouvement par des armées de plus en plus mécanisées. Il est ainsi possible que les autorités militaires détournèrent leurs intérêts pour les matériels de la guerre de position et l'arsenal de projectiles de tranchée, chargés d'explosifs instables, de conservation douteuse qui ne pouvaient connaître que d'autre issue : celle de la mise au rebus.

Mise au ban de l'arsenal chimique ?

La genèse du surplus des munitions chimiques fut aussi possiblement une conséquence directe d'évolutions de la réglementation internationale sur le développement, la production, le stockage et l'usage de ces armes. Bien que restant anecdotique par rapport aux pertes occasionnées par l'Artillerie et les armes à feu, l'utilisation massive de l'arme chimique (plus de 124 000 tonnes d'agents chimiques sur l'ensemble du conflit) causa le décès de 90 000 personnes et en blessa près d'un million[957] et marqua profondément les esprits en s'inscrivant aussi dans la mémoire collective comme un symbole de l'inhumanité et l'ignominie de la Grande Guerre. L'usage de ces armes était devenu massif chez les Alliés comme chez les Allemands en 1918, jusqu'à représenter plus du tiers des munitions en dotation de l'Artillerie au front.

Les années d'entre-deux-guerres furent jalonnées par les premières évolutions réglementaires internationales visant les armes chimiques. La première était le *Washington Naval Treaty* (« *Five-Power Treaty* ») prohibant l'usage des armes chimiques « *as justly condemned by the general opinion of the civilized*[958] ». Signé par les USA, la Grande-Bretagne, la France, l'Italie et le Japon, le traité fut ratifié par le Sénat des Etats-Unis le 29 mars 1922 par un vote sans appel (72 pour, 0 contre et 24 abstentions). Le second texte était le Protocole concernant la prohibition d'emploi à la guerre de gaz asphyxiants, toxiques ou similaires et de moyens bactériologiques (aussi appelé Protocole de Genève).

Il s'agit du premier texte international à interdire l'utilisation des armes chimiques et des armes biologiques. Le Protocole fut ouvert à la signature le 17 juin 1925 lors de la conférence sur le contrôle du commerce international des armes et des munitions à Genève et entra en vigueur le 8 février 1928.

Mais la portée du Protocole resta très limitée car il n'interdit pas la production, le développement, l'acquisition et le stockage des armes chimiques. Par ailleurs aucun régime ou système de vérification des dispositions ne fut adossé au Protocole. Lors de la signature du protocole, de nombreux États déclarèrent qu'ils se réservaient le droit de riposter au cas où un autre État utiliserait de telles armes à leur encontre. Le Protocole ne fut pas ratifié par les USA. Ces premiers accords internationaux portant sur la réglementation des armes chimiques n'imposèrent aucune obligation de destruction des arsenaux chimiques mais possiblement incitèrent les états signataires à le faire.

---

[957] L'essentiel sur le désarmement chimique [archive] sur le site de l'OIAC.

[958] MacLeod, R. *The Genie and the Bottle : Reflections on the Fate of the Geneva Protocol in the United States, 1918-1928*, In Friedrich, B., Hoffmann, D., Renn, J., Schmaltz, F., Wolf, M. (2017). *One Hundred ears of Chemical Warfare : Research, Deploment, Consequences*. Springer Open, 2017.

6. Restes Explosifs de Guerre. Quelles problématiques pour quels enjeux ?

6.1. INTRODUCTION

La présence sur et dans les sols, au droit et aux abords des anciennes lignes de front, de forts tonnage et de myriades d'engins explosifs ou encore à chargements spéciaux, épars ou en dépôts plus au moins bien organisés était, tout comme celle des vastes dépôts des surplus de guerre, problématique dans le contexte de l'immédiate sortie de guerre et ses impératifs de reconstruction des sols agricoles, des usines et infrastructures industrielles et de l'habitat. Les enjeux associés à ces Restes Explosifs de Guerre sont d'ordre sécuritaire, économique, foncier mais aussi possiblement psychologique et symbolique. Ils sont décrits dans ce qui suit.

6.2. UN FREIN A LA RECONQUETE DES TERRES AGRICOLES DEVASTEES

Le retrait des Restes Explosifs de Guerre présents en nombre au droit et aux abords des anciens champs de bataille s'imposa d'emblée dès la cessation des hostilités comme un enjeu sécuritaire et économique majeur de la sortie de guerre pour l'administration civiles et l'autorité militaire. Les combats de la Grande Guerre se déroulèrent majoritairement en campagne et de surcroît sur des terres de Champagne, de la Picardie et du Nord Pas-de-Calais, parmi les plus fertiles de France. Faire repartir l'agriculture dans le contexte du retour aux usages ordinaires des campagnes, du relevage de l'économie des secteurs dévastés, s'était d'abord apprendre à désobuser ces terres labourées par les détonations, à des échelles encore jamais connues auparavant. La reprise du labour ne pouvait être envisagée en toute sécurité sans (i) le retrait des éléments constituant les dispositifs de défense de circonstance (barbelés, queue de cochon, chevaux de frise et autres abris bétonnés, etc.), (ii) le remblaiement des tranchées et cratères puis le nivellement des terrains, (iii) le retrait des REG. Les risques inhérents à la présence des engins non explosés lors de la reprise des labours était identifié par les autorités « *L'ouvrier travaillant au nivellement du sol, le conducteur de tracteur agricole le cultivateur lui-même s'exposaient, à chaque instant à provoquer l'explosion d'un engin enfoui dans la terre*[959] ». Les accidents, inévitables, relatés par les archives et la presse, attestent de la dangerosité des travaux aux champs sur les terrains anciennement bombardés *« En automne, les socs de charrue heurtent des grenades et des obus qui explosent*[960] ». A titre d'exemple, dans le Pas-de-Calais « *Au cours des travaux de culture, 13 travailleurs furent tués, et 15 blessés. En outre, de nombreux accidenls furent signalés clans la population civile, la plupart dus à l'imprudence*[961] ». La reconquête des terres agricoles bouleversées et parsemées de REG était vue depuis 1914 par les instances politiques et l'autorité militaire comme essentielle, voire prioritaire dans le cadre de l'aménagement de l'arrière front puis de la reconstruction matérielle du pays.

[959] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. p. 485.

[960] Letouche, R. (2008). *Lorraine 1918. De l'armistice à la reconstruction*. Nancy, éditions de la Place Stanislas, p.77-78.

[961] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927, *op. cit*. p. 479.

Le 13 novembre 1918, un groupe de députés demanda, sans y parvenir, une rapide démobilisation des soldats issus du monde agricole, selon un principe de démobilisation adopté par les Britanniques (selon les besoins de l'économie et non à l'ancienneté comme en France)[962]. Cette démobilisation à la mode britannique fut contestée. Débutée le 16 novembre 1918, la démobilisation au sein de l'armée française s'acheva le 14 juin 1920. L'urgence de remettre les sols agricoles en état se heurta à l'immensité de la tâche à accomplir et aux délais de réalisation du « désobusage », beaucoup trop longs, en lien avec des difficultés organisationnelles et structurelles des services en charge de la récupération des engins de guerre au sein des armées dans l'immédiate sortie de guerre (cf. Section 7h du présent manuscrit). L'Etat (et en particulier le ministère compétent en la matière, c'est-à-dire celui spécialement créé, le Ministère des Régions Libérées) fut assailli par les demandes et rapidement débordé : « *Or, je [ndlr : Le Ministre des Régions Libérées, André Tardieux] suis saisi de tous les côtés de plaintes nombreuses des cultivateurs et des associations horticoles qui se plaignent que jusqu'à ce jour on n'a pas procédé au ramassage des obus non-explosés » […] « il serait nécessaire d'arriver dans un délai prochain à libérer complétement tous les terrains qui peuvent être facilement remis en culture afin de permettre le retour partiel des cultivateurs pour les semailles de printemps*[963] » (non daté).

La reprise hâtive de l'exploitation forestière pour le bois de chauffage, les matériaux de construction fut aussi immanquablement source d'accidents dont la presse locale se fit largement échos dans l'entre-deux-guerres. En Alsace par exemple, les bûcherons en forêt et les paysans sur les chaumes payèrent un lourd tribut à 1914-1918. Comme le 21 décembre 1921 lorsqu'un bucheron fut tué à Soultzeren par l'explosion d'une grenade après avoir allumé un feu, ou encore le 13 juillet 1923 lorsque Martin Heinrich, 11 ans, gardant ses vaches marcha par inadvertance sur un détonateur qui fonctionna le blessant gravement.

6.3. UNE MENACE POUR LES POPULATIONS GENERALES CIVILES SINISTREES ET UN FREIN AU RETOUR DES DEPLACES

> *« D'autre part, il a lieu de débarrasser au plus tôt les villages, hameaux, fermes et usines, des projectiles qui les encombre et dont la présence retarde la rentrée des sinistrés*[964] *»*

Les dangers inhérents à la présence des REG sur des territoires occupés par la population civile étaient déjà connue des autorités civiles et militaires durant le déroulement de la guerre, incitant ces dernières, dans un souci sécuritaire et de protection des populations, à organiser des campagnes de ramassage et de destruction des REG ainsi que des campagnes d'information par affichage public. Ces risques d'accidents étaient bien plus probables dans l'immédiate sortie de guerre comparativement au temps de guerre, car la population civile susceptible d'être exposée s'accrut significativement avec le retour des déplacés tout comme les quantités des REG qui connurent une inflation. Les munitions abandonnées, éparses ou en dépôts, entravèrent et retardèrent parfois aussi le retour sur leurs terres des populations déplacées[965].

---

[962] Cochet, F. (2018). *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle. 1914 – 1918*, *op. cit*.

[963] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16N 2586. Paris (non daté). Le Ministre des Régions Libérées à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau], Etat-Major de l'Armée – 1er Bureau. Signé : Lebrun.

[964] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 16 janvier 1919. Note. Signé : illisible.

[965] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 11 janvier 1919. Note 218. Signé : P.O. Le Major Général Buat.

Dans une note datée du 3 mars 1919 du Cabinet Civil du Ministre de la Guerre, à l'attention de M. le Maréchal de France Commandant en chef (Foch), l'autorité militaire fut informée du danger pour les populations civiles des Régions Libérées lié à la présence de nombreux engins non éclatés et abandonnés, épars ou en dépôts « *Il m'est signalé que, dans l'arrondissement de Péronne (Somme) de nombreux tas d'obus ou de grenades, qui ne sont pas suffisamment indiqués et que les personnes qui, peu à peu, réintègrent cette région ne se rendent pas suffisamment compte du danger qu'il y a à toucher ces munitions* »[966].

Les dangers liés à la présence de ces engins étaient aussi connus des autorités civiles qui les signalèrent au GQGA « *J'ai l'honneur d'appeler tout particulièrement votre haute attention sur la situation dangereuse pour les populations qui commencent à réintégrer les campagnes criblées encore de projectiles de toute nature non éclatés* »[967]. Ces populations qui côtoyaient au quotidien les projectiles méconnaissaient ces armes et engins de guerre et leurs pouvoir de destruction.

Les enfants étaient particulièrement vulnérables aux risques liés au REG car attirés par curiosité par ces objets insolites (en particulier les grenades), ils furent tentés de les manipuler dans l'ignorance complète de leur pouvoir d'attrition « *L'attention du Président du Conseil, Ministre de la Guerre, a été appelée sur des dépôts non gardés de munitions, cartouches, grenades, etc., qui se trouvent dans des carrières de la Maison Ciret-Pommier à Emeville (Oise) (…). Les enfants du village jouent avec les engins qui sont à leur entière disposition* »[968].

Dans les zones habitées péri-urbaines et rurales, les engins de guerre abandonnés affleurant, directement accessibles à la surface du sol, étaient source d'accidents qui « *sont légion depuis l'arrêt des combats. En hiver, les enfants mettent des détonateurs dans les fourneaux, qui éclatent*[969] *»*. Le Chef de Brigade H.C. Tillet rapporta ainsi l'explosion accidentelle survenue au moulin de Maherne à Monthermé (département des Ardennes) le 5 mars 1919 suite à la détonation d'un stock de poudre noire abandonné par les Allemands, causant la mort d'un soldat, blessant trois civils et provoquant la disparition d'une fillette Margotte dont les restes ne furent pas retrouvés. L'explosion faisait suite à l'intrusion de cette dernière dans le dépôt. Le rapport concluait « *Ce dépôt a été signalé à l'autorité militaire par la Brigade n°4 de Monthermé en date du 22 novembre* ».

Les anciens champs de bataille devinrent aussi dans l'immédiat après-guerre des lieux fréquentés par des civils, non avertis aux dangers de ces lieux et aux engins de guerre qu'ils pouvaient encore receler. La fréquentation de masse des lieux dans le cadre du tourisme mémoriel fut promue. Il s'agissait par exemple des hauts lieux de combats en Haute-Alsace avec les sites du Lingekopf (cf. Figure 153) et de l'Hartmannswillerkopf (où des mémoriaux furent construits avec des chemins sécurisés facilitant leur accès depuis les vallées). En avril 1921 à l'Hartmannswillerkopf (croix du Silberloch) une grenade explosa suite à l'allumage d » *un feu pour se réchauffer* » et blessa quatre touristes[970].

---

[966] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du 3 mars 1919 du Cabinet Civil du Ministre de la Guerre, à l'attention de M. le Maréchal de France, Commandant en chef.

[967] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr Le Préfet de l'Aisne, Laon, du 20 mars 1919 à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef.

[968] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du 5 mars 1919 du Chef du Cabinet Civil du Président du Conseil, Ministre de la Guerre au Maréchal Commandant en Chef (confirmation de message téléphoné le 27-2-19, à 19H.40).

[969] Letouche, R. (2008). *Lorraine 1918, De l'armistice à la reconstruction*, *op. cit*.

[970] Archive départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Secrétariat Général, service des investigations. L'accident de l'Hartmannsweiler. Coupure de presse. Non datée

Figure 153 : Visite du site du Schratzmaennele, dans le secteur du Linge, par une classe de la vallée de Munster au printemps 1919[971].

6.4. UN OBSTACLE A LA RESTAURATION DES DROITS FONCIERS ET A LA LIBRE JOUISSANCE DE LA PROPRIETE PRIVEE

Les terrains sur lesquels les vastes dépôts de munitions furent installés, furent généralement sèchement réquisitionnés d'office par les armées (françaises et alliées, ou encore allemandes dans les régions envahies et les anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine) du fait des circonstances de la guerre. Les propriétaires revendiquèrent dès la fin des hostilités la restitution de leurs biens fonciers dans le respect du droit à la propriété privée assortie d'une indemnité pour les dommages et préjudices subits. Des dispositions règlementaires furent contractées par les autorités civiles (aux échelles départementales) ou militaires (Le Ministère de la Guerre) pour indémniser les propriétaires sur toute la durée séparant la réquisition et l'installation des dépôts jusqu'à leur évacuation et liquidation.

Une délibération du Conseil général du Pas-de-Calais en date de 1922[972], souligne, au sujet des dépôts de matériels et de munitions délaissés par l'Armée britannique que « *Le maintien sur place de ces installations occasionnait un grave préjudice aux intérêts généraux du pays, ainsi qu'aux intérêts des particuliers, par suite de l'impossibilité, pour les propriétaires de rentrer en possession de leurs terrains et de les rendre à leur destination normale* ».

Un autre exemple est celui du dépôt de munitions chimiques créé en 1918 à cheval sur les communes de la Ferté-Hauterive et de Saint-Loup dans le département de l'Allier « *Dans le cours de 1918, on avait réquisitionné pour y entreposer les munitions spéciales 117 hectares* [973]». Une archive met en exergue de façon particulièrement éclairante les tensions entre autorités civiles et militaires liées à la levée dans l'immédiat après-guerre des réquisitions du temps de guerre.

---

[971] Collection particulière, Hensel, F. https://www.lalsace.fr/actualite/2018/11/11/du-champ-de-bataille-au-site-memoriel

[972] Bibliothèque nationale de France. Pas-de-Calais. *Rapports et délibérations. Conseil Général. 1922. Quatrième partie. Liquidation des Stocks*. p. 344.

[973] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. 2e et 13e Régions. Service de l'Artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport particulier fait par M. Gras contrôleur de 2e classe. 5 mai 1921. p.9.

Il s'agit d'une abondante correspondance (lettre mémoire) datée du 7 janvier 1922 de Mr le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin[974] concernant le dépôt de munitions et l'usine ex-allemande du MA3 (*Munitionsanstallt n°3*) d'Illkirch-Graffenstaden. Dès mars 1919, Mr le Maire s'adressa par courrier au Haut-Commissaire de la République à Strasbourg, (Gabriel Alapetite) demandant à ce que sa commune soit indemnisée pour la réquisition en décembre 1916 par l'autorité militaire allemande d'une parcelle boisée d'environ 25 hectares pour y installer l'usine de munitions et les dépôts du MA3. Des négociations furent entamées dès le 3 septembre 1919 entre la commune et deux officiers du Service de l'artillerie de la place de Strasbourg. Aux termes de 33 mois d'échanges épistolaires entre la commune et diverses strates des autorités civiles et militaires, régionales et centrales, pour une prise de décision sur un litige et un règlement d'une situation héritée du temps de guerre et du temps allemand, ce fut un *statu quo*. Le Ministère de la Guerre décida in fine de racheter le terrain à un prix ridiculement dérisoire, bien en deçà de sa valeur vénale réelle. Le courrier, avec sa description chronologique minutieuse des échanges, met en exergue l'immobilisme d'une administration française, et des décisions, lorsqu'elles furent prises, dénuées de sens logique au regard des préoccupations locales. La multiplication des interlocuteurs auxquels s'adressait la commune témoigne de la nébuleuse administrative installée par les Français en Alsace mais aussi de l'impuissance des élus locaux face (i) aux règlements des questions de l'occupation allemande et (ii) à l'omniscience de l'autorité militaire qui semblait faire fi des questions et droits civils.

Ces situations entretinrent un climat de défiance des Alsaciens-Lorrains et des pouvoirs civils locaux à l'égard des nouvelles structures décisionnelles et administratives importées par Paris, qui reprenait possession, après plus de 40 ans d'administration allemande, des anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (cf. Section 9h du présent manuscrit).

6.5. L'ENCOMBREMENT DES VOIES DE CHEMIN DE FER PAR DES CONVOIS DANGEREUX. UNE LOGISTIQUE DE LA RECONSTRUCTION MATERIELLE ENTRAVEE.

La guerre déstructura et endommagea les réseaux viaires, ferroviaires, navigables et distributeurs. Par ailleurs, de nombreux convois, parfois chargés de munitions, délaissés en pleine voie par les Allemands lors de leur retraite encombraient, voire saturaient çà et là les voies ferrées, les gares et faisaient aussi par ailleurs – ainsi délaissés - courir à ces infrastructures, leurs utilisateurs et aux riverains de graves dangers d'incendies et/ou d'explosions. La reconstruction au sens large, avec ses besoins d'évacuation de matériels, matériaux, d'acheminement de biens et personnels pour la construction, ne put réellement débuter que lorsque furent libérées et remises en état ces infrastructures logistiques.

Les sociétés privées exploitant ces réseaux étaient aussi désireuses de reprendre pleine possession de leurs biens. Le Réseau du Nord exigea ainsi par une note au GQG du 23 février 1919 « *l'enlèvement des grenades et explosifs divers existant dans les emprises du Chemin de Fer, dans les régions de Compiègne et Tergnier* »[975].

[974] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Lettre mémoire datée du 7 janvier 1922 de Mr le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin concernant le dépôt de munitions et l'usine ex-allemande du MA3 (Munitionsanstalt n°3) d'Illkirch-Graffenstaden.

[975] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Général, Directeur général des transports militaires à Monsieur le Maréchal de France Commandant en Chef des Armées Françaises du 11 mars 1919.

Suite aux nombreuses explosions accidentelles s'étant produites sur ou à proximité des infrastructures ferroviaires « *endommageant les lignes ferrées et télégraphiques et entravant la circulation des trains* », le GQG produisit une note datée du 2 avril 1919 exigeant que « *les Commandants de Région donneront les ordres nécessaires pour que les équipes chargées de la destruction de munitions se mettent en rapport avec toutes les autorités du Service des Chemins de fer (Compagnies de sapeurs de chemins de fer, Chefs de gares, etc…) susceptibles de leur fournir des renseignements, de façon qu'un nettoyage méthodique soit effectué en accord complet avec les Réseaux intéressés* »[976]. Quelques chiffres éloquents illustrent bien l'importances des convois de munitions abandonnés sur les voies ferrées dans les secteurs des armées. On rappelle que quelques 1 200 wagons de munitions ex-allemandes étaient restées immobilisées sur le territoire de la Ve Armée française en Belgique en date du 8 janvier 1919[977].

Les archives relatent une explosion accidentelle survenue en gare de Givet (département des Ardennes) en mars 1919 qui menaça les populations locales et de propager la détonation à un dépôt de munitions proche voisin « *occasionné par explosion de wagons allemands chargés de torpilles et explosifs ; un dépôt de 1 500 obus de 150 se trouve face de cette gare à 15 m voie ferrée et contigu à immeuble habités* »[978]. Un train de wagons chargés d'obus allemands de gros calibre était déjà entré en explosion en gare de Fourmies (Avesnois, département du Nord) dans le nuit du 8 au 9 novembre 1918, soufflant la gare et les proches superstructures ferroviaires, et dispersant le chargement en obus, intacts ou endommagés. Un autre train chargé de munitions fit explosion en pleine voie, non loin de là, entre Anor et Mondrepuis en 1919 (cf. Figure 154). Les projectiles endommagés et dispersés par les détonations accidentelles, devenus instables, constituèrent une menace supplémentaire pour les populations riveraines. L'intervention de l'autorité militaire était alors requise pour sécuriser les lieux.

Figure 154 : Epaves d'un train de munitions après son explosion en pleine voie entre Anor et Mondrepuis (Avesnois, département du Nord) en 1919. Une équipe de prisonniers de guerre allemands en uniforme s'affaire au dégagement des décombres[979].

[976] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG Note. Munitions dangereuse à proximité des voies ferrées. Grand Quartier Général des Armées françaises de l'Est. Etat-Major. Direction de l'Arrière, à l'attention du Général des Armées Fayolle – Armées – Régions Frontières. 2 avril 1919. Signé P.O. le Major Buat.

[977] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 8 janvier 1919 au Chef de la Mission Belge près du DGCRA. Signé : Renon.

[978] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR16 N 2586. Message reçu le 14 mars 1919 à 21H40. Président Commission Interministérielle à Maréchal Foch.

[979] Collection particulière Chrisnord, http://chris59132.canalblog.com/albums/guerre_14_18/index.html

6.6. LA RECONSTRUCTION INDUSTRIELLE A SECURISER

Comme nous l'avons vu dans ce qui précède, nombreuses furent les usines sous occupation allemande qui servirent de caches à des dépôts de munitions. A l'armistice, la reprise en main de ces usines puis leur remise en route étaient impensables– pour des raisons évidentes de sécurité - tant que ces lieux ne furent débarrassés des engins abandonnés. Il en était de même pour les usines, carreaux de mines, endommagés ou réduits à l'état de ruines qu'il fallut relever pour la reconstruction industrielle des régions dévastées. « *L'intérêt spécial qui s'attache à la libération rapide des usines a été signalé aux Armées par Notes 8806 / DA, du 29 novembre et 8099 du 22 décembre [1918]*[980] ». Clémenceau appela à nouveau l'attention du Maréchal Foch par sa lettre n°507/11 du 9 janvier 1919 « *sur l'intérêt que présente la reprise immédiate de l'activité industrielle dans les régions libérées*[981] ».

Foch répercuta cette ligne directrice à la Direction en charge de l'enlèvement des munitions dans son courrier du 11 janvier 1919, s'exprimant en ces termes « *J'ai […] l'honneur de vous demander de vouloir bien faire étendre le service de récupération des munitions et explosifs aux localités habitées en plaçant en première urgence les locaux industriels en bon état et susceptibles par suite d'une remise en marche rapide*[982] » « *Le Gouvernement Français m'adresse journellement des demandes d'Industriels des Régions Libérées tendant à obtenir instamment l'évacuation de leurs usines par les troupes alliées. J'ai l'honneur de vous demander de vouloir bien rappeler aux Unités sous vos ordres les instructions déjà données pour hâter la libération des Etablissements Industriels. C'est une impérieuse nécessité pour la reprise de vie économique de nos régions industrielles, et le retour à la vie normale d'une notable partie de la France. J'appelle en particulier votre attention sur […] l'enlèvement des lieux habités et en particulier des usines, des munitions ou explosifs abandonnés par l'ennemi, ou stockés par les Armées Alliées*[983] ».

6.7. LA PRESENCE ANXIOGENE DES RESTES DE GUERRE ABANDONNES

La présence des dépôts de munitions sur les sols français et belges dans l'immédiat après-guerre fut, au regard des archives consultées, explicitement anxiogène pour les populations civiles de sinistrés qui eurent, bien malgré elles, à les côtoyer. Cette population de sinistrés et de déplacés ignorait les réalités de la guerre, du combat et celles du pouvoir d'attrition et de destruction de ces armes. Bien que l'armistice eut été signée, ces monceaux d'engins destructeurs hérités de la guerre parmi ces populations qui n'aspiraient qu'à restaurer une nouvelle forme de normalité, jouèrent comme une réminiscence symbolique de la guerre, telle une butte témoin guerrière semblant résister au temps pacifié.

Nombreux furent les incendies et explosions accidentels au sein de ces dépôts, mal gardés, mal organisés, au sein desquels les conditions d'entreposage ne favorisaient pas la bonne conservation des munitions, et qui attisèrent parmi les populations civiles, craintes et angoisses face à des périls qu'elles croyaient relégués au passé.

---

[980] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 16 janvier 1919. Note. Signé : illisible.

[981] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQGA, le 11 janvier 1919. Le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées (DGCRA) à Monsieur le Maréchal de France, commandant en Chef les Armées Françaises (DA). Signé : P.O. le Major Général Weygand.

[982] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQGA, le 11 janvier 1919, *op. cit*.

[983] *Ibid.*

Les correspondances entre autorités militaires et civiles, qui se partagèrent la responsabilité de l'enlèvement de ces dépôts et de la protection des populations, ainsi que la presse, qui relaya dans ses colonnes ces sinistres, usèrent pour les décrire d'une rhétorique guerrière: il est question de « théâtre des opérations », « d'occupation », « de destructions », « de fuites et d'exodes ». Pour ces populations, la Grande Guerre ne semblait pas encore terminée.

Nombreux sont les documents d'archives relatant les explosions accidentelles au sein de dépôts. Quelques exemples sont exposés dans ce qui suit.

Le 25 mars 1919, une dizaine explosions particulièrement violentes se produisirent dans le dépôt de munitions anglaises et allemandes de Blargies (département de l'Oise), situé sur les quais de cette gare. A chaque fois les mêmes scènes, de destruction, de dégâts occasionnés furent relatées « *les explosions ont été d'une telle violence que de nombreuses maisons du village, notamment celles qui se trouvent dans un rayon de 200 m, ont été fortement détériorées. Les portes et les fenêtres ont été arrachées, les toitures enlevées et plusieurs murs se sont écroulés* ».

Les engins, parfois endommagés, n'ayant pas détonés, furent projetés et dispersés par les explosions « *Des obus non éclatés sont tombés de côté et d'autre dans le village qui eut aussi de nombreux éclats d'autres obus* »[984].

A Spincourt, dans le département de la Meuse, l'explosion d'une partie du vaste dépôt de munitions, en partie ex-allemandes, le 17 mai 1919[985], projeta des obus lourds dans le village à plus d'un kilomètre du point d'explosion, cribla d'éclats les toitures et certaines portes des habitations.

Ces accidents causèrent aussi des accès de panique au sein de la population locale, qui, pour se mettre à l'abri, prirent la fuite « *La population prise de panique s'est enfuie dans toutes les directions* »[986].

Des exemples d'accidents bien documenté sont ceux des dépôts ex-allemands abandonnés sur l'ancien territoire annexé du *Reichsland Elsass-Lothringen*. Les plus grands d'entre eux renfermaient des projectiles chimiques comme le dépôt du Bois de Lorraine dans le Bas-Rhin, à proximité immédiate des limites administratives du département de la Moselle, le vaste dépôt de *Hartwald* au nord-est de Mulhouse (actuel département du Haut-Rhin) ou encore celui du Bois-de l'Hôpital. Le contexte socio-politique local spécifique à ces territoires dans l'immédiat après-guerre, paralysant les autorités civiles et militaires qui eurent les plus grandes difficultés à faire évacuer des dépôts qui se déprécièrent avec le temps, généra un terreau particulièrement favorable au déclenchement d'incendies et d'explosions accidentelles dans ces dépôts.

Une section est spécifiquement dédiée dans ce travail de recherche au cas particulier du désobusage et de l'élimination des dépôts ex-allemands des anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (cf. Section 9h du présent manuscrit). Il s'agit précisément d'exemples tragiques de survenue d'accident liés à des projectiles qui tardèrent à être évacués. Prenons le cas du dépôt de munitions du Bois de Lorraine.

---

[984] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Rapport du Capitaine Commandant la Gendarmerie de l'arrondissement sur une explosion de munitions. Valenciennes, le 25 mars 1919.

[985] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Rapport du lieutenant Mathis de la 2e compagnie de gendarmerie des Ardennes, arrondissement de Montmédy, daté du 20 mai 1919, communiqué au préfet de la Meuse le 23 mai 1919.

[986] *Idib*

Dès décembre 1919, le Préfet du Département du Bas-Rhin signale au Général Gouverneur militaire de Strasbourg « *les dangers que constituait, pour la population des communes de Keskastel et Herbitzheim, la présence d'un dépôt de munitions* »[987]. Le dépôt dit du Bois de Lorraine aurait encore contenu entre autres 40 000 obus chimiques. Une Épée de Damoclès que des évènements justifièrent.

Le 19 juillet 1920, plus de sept mois après le signalement du Préfet, deux violentes explosions survinrent dans le dépôt, détériorant plusieurs toits et brisant de nombreux carreaux dans la commune voisine de Sarralbe (département de la Moselle), où « *la population était affolée et où les habitants s'étaient déjà rassemblés pour fuir* ». Par chance, seules des piles d'obus explosifs sautèrent. « *Les populations restent terrorisées et ne se trouveront vraiment rassurées que lorsque le dépôt [ndlr : Bois de Lorraine] aura disparu* »[988]. L'angoisse des populations locales fut relayée par la presse francophone (Le Lorrain, La Dépêche de Strasbourg) et germanophone (*Strassburger Neue Zeitung*, La République) qui pointa l'urgence de l'évacuation de ces dépôts.

La Dépêche de Strasbourg du 21 janvier 1921 titra plus tard « *Près d'un volcan. Un camp de munitions "oublié" près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes !*[989] ». Les détonations avaient ouvert un cratère de 15 mètres de diamètre pour 2 m de profondeur.

Les officiers du PAR de Metz qui se rendirent sur place constatèrent la non-conformité du dépôt qui ne respectait pas les distances de sécurité réglementaires entre chacun des ilots formant le dépôt.

Les dépôts laissés par les Britanniques sur le sol français, propriété du royaume d'Angleterre, étaient aussi source d'inquiétude pour les autorités civiles françaises (Le Ministère des Régions Libérées) soucieuses de la protection des populations proches voisines. Des consignes furent alors transmises par la France (par l'entremise de l'ambassade de France et le Ministère des Affaires étrangères) à son allié par les voies habituelles de la diplomatie afin d'informer le Secrétaire d'Etat de Sa Majesté de la situation périlleuse. C'est ainsi que Paul Cambon s'adressa par courrier le 29 septembre 1920 au Comte Curzon de Kedleston « *en vue de faire donner les instructions nécessaires pour assurer l'enlèvement des explosifs, dans le plus bref délai possible* [990]».

Particulièrement marquante, à la lecture des archives consultées, est la peur qui saisissait ces populations à l'idée, fondée ou fantasmée, que ces dépôts renfermaient ou pourraient renfermer des engins à chargement chimique. L'arme chimique cristallisait sur elle dans l'immédiat après-guerre, dans les représentations de la guerre, toute son horreur et son inhumanité que les populations alors rejetaient.

---

[987] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Préfecture du Bas-Rhin. Le Préfet du département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) à Strasbourg. Dépôt de munitions de Keskastel. Strasbourg, le 22 juillet 1920. Signé : illisible.

[988] *Ibid.*

[989] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402 *La Dépêche de Strasbourg* du 21 janvier 1921. *Près d'un volcan. Un camp de munitions "oublié" près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes !*

[990] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7010. Paul Cambon au Comte Curzon de Kedleston. 29th September 1920.

Une simple fumée colorée émanant de l'incendie d'un dépôt de munitions était immédiatement suspecte et sujette aux interprétations les plus alarmistes. Le quotidien *Le Lorrain* du 29 juin 1921 relata dans une tribune au sujet de l'incendie qui s'était déclaré la veille dans le dépôt ex-allemand du Bois de l'Hôpital au sud-est de Metz (département de la Moselle), « *Aucun incendie de forêt comme on se l'imagine ; les feuilles mortes seules se consument lentement, et la fumée jaune qui plane sur le bois est due à l'acide picrique qui se dégage de certains obus qui éclatent. Ce que les habitants redoutent, c'est l'explosion des obus à gaz*[991] ».

Mais les accidents, impliquant des civils comme des militaires, au contact des engins chimiques entreposés dans les grands dépôts de ce type de munitions étaient aussi une réalité.

Le 20 décembre 1918[992], un courrier de la Société des Fourneaux de Saulnes à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle demande que soit signalé aux autorité militaires les » *munitions, obus à gaz, explosifs, etc. ..constituent un danger très grand pour la localité et ses environs* » puis poursuivant par « *J'insiste sur l'importance exceptionnelle de ce dépôt, qui était le dépôt central du front de l'ouest. Il ne nous est pas possible de songer à laisser entrer quiconque dans les usines et, par suite, de nous rendre compte des détériorations occasionnées par l'ennemi et y remédier. C'est à vous signaler l'urgence des mesures à prendre* »[993]. Non loin de Saulnes le dépôt de munitions qui était situé à 1800 m de la gare de Mont-Saint-Martin, « *où s'effectuait corvées de déchargement munitions par PG encadrés* » fit explosion le 30 janvier 1919, à 15H30 [994]. « *74 PG et une garde d'un caporal et deux soldats français qui manipulaient les obus ont dû être victimes, aucun d'eux n'a reparu. Plusieurs blessés usine de Rodange. Dégâts matériels importants à Longlaville & Mont-Saint-Martin* »[995]. Saulnes est connue du Service du Déminage. En 1956 un accident par obus à l'*Ypérite* y tua deux enfants et incommodèrent tous ceux qui tentèrent de les sauver.

Le rapport de la gendarmerie qui fut établi suite à l'explosion accidentelle au sein du vaste dépôt de rassemblement établi à proximité de Spincourt du 17 mai 1919 concluait que le pire avait peut-être été évité car « *cette explosion a pu se circonscrire heureusement dans la périphérie du dépôt explosé, car à 20 m environ au nord se trouve un important dépôt d'obus à gaz*[996] ».

---

[991] Archives départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. *Le Lorrain* du 30 juin 1921.

[992] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr le Directeur de la Société Anonyme des Mines d'Amermont-Dommary à Bouligny (Meuse) à Mr Pinot, Secrétaire Général du Comité des Mines de Fer de Meurthe-et-Moselle, Paris.

[993] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courier des Société des Fourneaux de Saulnes à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle du 20 décembre 1918.

[994] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Télégramme n°6000 / B E.M. du 01 février 1919 au GQG.

[995] *Ibid.*

[996] Archives départementale de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. 2e Corps d'Armée. Gendarmerie Nationale, 2e Légion, Compagnie des Ardennes, Arrondissement de Montmédy. Rapport du Lieutenant Mathis sur l'explosion d'un dépôt de munitions à Spincourt, *op. cit.*

6.8. L'ENLEVEMENT DES ENGINS DE GUERRE : L'AFFIRMATION D'UNE IMPERIEUSE NECESSITE

S'il ne fait aucun doute que la récupération, voire la destruction des REG était un impératif et un prérequis incontournable aux travaux de remise en état des sols et la reconstruction agricole, industrielle et de l'habitat, elles s'affirmèrent aussi rapidement dès la cessation des hostilités comme impérieuse, pour de multiples raisons.

6.8.1 Réduire les probabilités d'accidents et relancer rapidement l'activité agricole et économique des territoires dévastés

Comme cela a été explicité dans ce qui précède, récupérer et neutraliser le plus rapidement les engins de guerre épars ou en dépôt abandonnés, c'était réduire les risques d'incendie et d'explosion et les atteintes matérielles, corporelles, et psychologiques aux populations de sinistrés, et permettre le retour en toute sécurité des populations déplacées. Le retour au champ en toute sécurité de ces populations pour l'essentiel paysannes était de prime importance pour la relance de l'activité économique et de l'agriculture dans le grand quart nord-est de la France.

6.8.2 Dépréciation des engins de guerre. Phénomènes et conséquences

Au-delà de l'urgence à reloger en toute sécurité les sinistrés et déplacés, à relancer l'activité économique au droit des anciens champs de batailles et zones dévastées, le temps ne fit qu'accroître la dangerosité des Restes Explosifs de Guerre et autres engins présents dans les surplus et donc le caractère périlleux de ces accumulations de matériels et matières restées en puissance d'explosion.

Les munitions étaient des objets manufacturés produits en grande quantités en temps de guerre, pour être utilisés dans un temps relativement bref après leur sortie de l'usine dans les circonstances du temps de guerre. Il s'agit de matériels assimilés à des consommables.

Les engins de guerre ne se conservaient pas et, laissés inutilisés, étaient voués à l'obsolescence, les rendant instables, dangereux, inefficaces et donc globalement, inutilisables. Ils durent alors être déclassés et mis hors service, rebutés et parfois abandonnés comme « déchet de guerre ».

De nombreux dépôts de munitions avaient été organisés en pleine campagne, et exposés aux intempéries et à de fortes amplitudes thermiques, notamment en lien avec la succession des cycles diurne / nocturne. Les premiers effets du temps furent ceux causés par l'humidité avec l'apparition des premiers signes de la corrosion : la perte des peintures des projectiles et notamment des marques distinctives permettant d'identifier leur chargement. Pour de nombreux projectiles, ces marques étaient les seuls moyens de faire la distinction entre engins conventionnels de ceux chimiques ou incendiaires. Cette disparition rendait hasardeuse toute tentative de manipulation lors des opérations de réallotissement et de réorganisation des dépôts.

Certains projectiles allemands, notamment (de *Minenwerfer*) chimiques, étaient conçus pour être tirés de suite après leur chargement ; ces engins étaient alors dotés de fusées faites d'un alliage de mauvaise qualité à base de zinc et d'aluminium, en lieu et place du laiton (fait de métaux nobles, de bonne conservation). Ces fusées se corrodèrent (corrosion bimétallique) rapidement sur ces engins sujets alors aux risques de fuites à l'ogive.

Ensuite, les écarts de température, comprenant des phases de températures élevées (en plein soleil) étaient favorables à la déstabilisation des chargements des grenades et projectiles d'artillerie de tranchée chargés d'explosifs (per)chloratés. En effet, la paraffine formant la matrice stabilisante des sels de (per)chlorate fondant sous l'effet de la chaleur, les sels avaient tendance à se dissocier de la paraffine qui par ailleurs se contractait. Le chargement devenait ainsi mobile dans le corps des projectiles, et extrêmement sensibles aux chocs et à la friction du fait de la présence des sels qui n'était plus enrobés par leur stabilisant paraffiné. Cette situation décuplait les risques d'explosion lors de manipulation.

Les toxiques de guerre et en particulier le phosgène et l'*Ypérite* se dégradèrent avec le temps au contact de l'acier formant l'intrados des projectiles. S'y formait au contact du phosgène du pentacarbonyle de fer. Le phosgène avait tendance à se mettre en surpression pouvant conduire à des éclatements spontanés et à la dispersion accidentelle du chargement. Plusieurs accidents de ce type, même récents sont connus du Service du déminage (communication orale personnelle). L'*Ypérite* quant à elle polymérisait dans les obus en mettant l'espace de tête ogival sous pression. Cette *Ypérite* polymérisée prenait en masse tout en conservant ses effets vésicants[997]. Le désamorçage par retrait de la fusée et de la gaine d'éclatement de ces engins dont le contenu était sous pression devint donc extrêmement dangereux et cause de nombreux accidents relatés par la presse de l'entre-deux-guerres. Les fusées étaient ainsi violemment propulsées au visage de l'opérateur. Parfois, l'*Ypérite* liquide et gazeuse sous pression jaillissait par l'œil de l'obus et venait gravement brûler la personne en charge du désamorçage manuel. Cet extrait de l'Humanité du 06 mai 1932 intitulé « *Alerte aux gaz ! l'Ypérite* » témoigne des surpressions apparues au sein des obus chimiques anciens.

« *C'était en automne 1927, à la 3e Compagnie du 130e B.O.A. [ndlr : Bataillon d'Ouvrier de l'Artillerie] au camp de la Ferté-Hauterive (Allier). […]. Le travail […] consistait à dérouiller de vieux obus venant du front. Les obus contenaient des gaz asphyxiants. Souvent un sifflement semblable à un sifflement de locomotive se faisait entendre : c'était un obus « fuyard ». On sonnait l'alarme, sautait sur les masques que nous ne quittions pas et on allait enterrer l'obus [998]».*

Les artilleurs, en charge de la surveillance des dépôts de munitions, constatèrent aussi que les engins chimiques montraient des signes de dépréciation, certains d'entre eux, estimés à 1 pour 100 projectiles[999], devenant aussi fuyards à l'ogive.

De nombreux obus explosifs de la Première Guerre mondiale furent chargés avec de l'acide picrique (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*) ou des mélanges binaires ou ternaires avec cet acide. L'acide picrique réagissait au contact du fer à l'intrados des obus et fréquemment à l'ogive en produisant des sels de picrate de fer (phénomène de picratation) (cf. Figure 155). Ces sels étaient extrêmement sensibles aux chocs, à la chaleur et à la friction et leur présence, encore de nos jours, redoutée par les démineurs. La nitrocellulose mal ou insuffisamment stabilisée, constituant la base des poudres propulsives, était sujette à des exsudations nitrées qui rendaient le propulseur instable. Il en fut de même pour les di- tri-ergols renfermant de la nitroglycérine (exsudats de nitroglycérine).

---

[997] Bélot, H. *L'Ypérite. Sulfure d'éthyle dichloré*. Communication personnelle. Non publié

[998] Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité*. 6 mai 1932. « *Alerte aux gaz ! l'Ypérite* ».

[999] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. 2e et 13e Régions. Service de l'Artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport particulier. Mr Gras. 5 mai 1921.

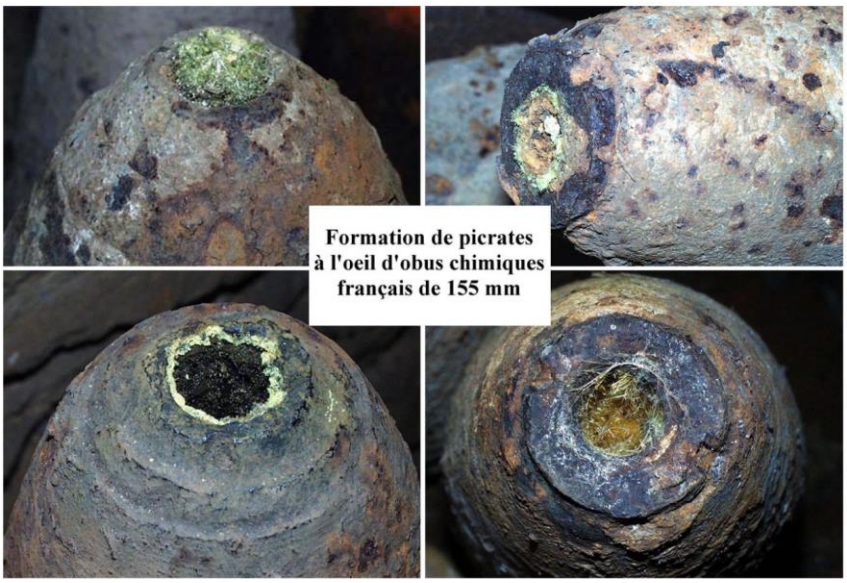


Figure 155 : Picratation à l'œil d'un obus chimique de 155 mm[1000].

Les quantités de munitions hors service, obsolètes s'accrurent donc avec le temps dans les surplus militaires du fait de la dégradation des engins arrivés au terme de leur conservation, accroissant les risques d'incendie et d'explosion, pouvant être catastrophiques, vues les quantités entreposées dans certains dépôts. Il en était de même des risques croissants d'émanations et d'écoulements de toxiques de guerre d'engins chimiques devenus fuyards. Des munitions initialement en bon état se déprécièrent donc avec le temps, devenant par cette obsolescence, non seulement inutilisables mais aussi dangereuses.

6.8.3 Entre guerre et paix. Une récupération à hâter face aux perspectives des démobilisations

« It is harder to demobilize than to mobilize[1001] *»*

Le GQG et le Ministère de la Guerre avaient déjà parfaitement conscience, durant la guerre, que le nettoyage et la pacification des sols des anciens champs de bataille par la main d'œuvre militaire était imparfaite, superficielle et partielle du fait (i) d'une part de l'immensité de la tâche à accomplir et (ii) d'autre part du manque de main d'œuvre qualifiée. Pendant le conflit, le rythme de la récupération militaire fut toujours contraint par la disponibilité des personnels en arme pour des tâches non combattantes, au regard des besoins de forces combattantes. La question de la main d'œuvre allouée aux opérations de récupération et de désobusage se posa encore avec plus d'acuité dans la sortie de guerre en raison (i) de la perspective de la disparition progressive mais inéluctable de cette main d'œuvre militaire et (ii) de l'inflation des tonnages des REG. L'urgence des travaux de récupération et de désobusage devint possiblement aussi celle du bénéfice d'une main d'œuvre militaire encore mobilisée au terme des hostilités.

[1000] Collection particulière, Bélot, H. *Quelques exemples de corrosion à risque de munitions anciennes*. Non publié. Communication personnelle.

1001 Sexton, F. H. (1918), cité dans Neumann, B. F., Makawicki, S. D. (2019). *Occupation and demobilization (1918 – 1923). The US Army Campaigns of Word War I Commemotaive Series*. Editor: Brian F. Neumann. Center of Military History. United States Army, Washington, D.C.

Démobilisations militaires

L'armistice du 11 novembre 1918, qui entérina la fin des combats à l'ouest, ne fut pas ce couperet faisant une scission nette et franche entre le temps de guerre et le temps de paix. S'ouvrait avec cette première signature une période complexe, achevée avec la signature du Traité de paix du 28 juin 1919 à Versailles et son entrée en vigueur en janvier 1920, un temps qui n'était plus vraiment la guerre pas encore totalement la paix. Ce temps transitoire était dédié à des tâches tout aussi titanesques et complexes que la guerre. Reconstruire le quart nord-est de la France, relever les ruines, assurer la transition entre l'omnipotence des militaires à la tête du pays et une nouvelle administration civile à inventer, et aussi démobiliser des hommes par millions et, pour la France qui se dissocia sur ce point de ses Alliés, faire payer l'Allemagne, jugée seule coupable et responsable de la guerre.

Il s'agissait aussi de démobiliser. Mobiliser progressivement dans la perspective d'une guerre rapide et victorieuse était souvent bien plus simple et bien moins complexe que de démobiliser des millions d'hommes portant l'uniforme, ayant connu le front, ses souffrances, psychiques comme physiques, et toute une société entièrement vouée quatre ans durant à la culture de guerre, transformée en une société du deuil dans l'après-coup. L'organisation de l'industrie et les modes de production devaient à nouveau être repensés. Aucune des parties alliées ne s'était préparée à un si subit arrêt des hostilités.

Les hommes du rang, accaparés par les combats de la puissante poussée alliée pour rejeter les Allemands vers leurs frontières en 1918, restèrent encore officiellement et administrativement mobilisés fin 1918 tout en ayant déposés les armes.

Environ 2 559 000 Français étaient encore déployés en métropole (au côté de 1 800 000 Britanniques et 1 900 000 Américains).

La démobilisation des combattants français de la Première Guerre mondiale, étalée sur une période de 19 mois, débuta le 16 novembre 1918 pour s'achever 14 juin 1920. Elle fut lente, du fait de la prudence de l'Etat-Major qui ignorait tout de l'état de déliquescence réel de l'Armée allemande au moment de l'armistice et identifiant toujours en l'Allemagne un ennemi potentiel susceptible de retourner les armes contre la France. Elle fut aussi suspendue pendant quatre mois début 1919 suite aux tensions diplomatiques autour des questions des résolutions de la guerre et du paiement par l'Allemagne des préjudices de guerre.

L'Armée française souhaitait aussi maintenir des effectifs lui garantissant sa supériorité militaire sur l'Allemagne durant la période entre le premier armistice du 11 novembre 1918 et la signature du Traité de paix de Versailles pour faire plier l'Allemagne aux exigences de la France. L'avancée alliée et française de 1918 avait redéployé dans cette logique les Corps d'Armées dans le quart nord-est de la France. Puis les autorités furent débordées par la masse d'hommes à démobiliser. Le Commissariat du peuple à la démobilisation tenta d'organiser le retour des soldats dans leurs foyers. Les classes 1907 à 1909 furent libérées du 9 juillet au 9 août 1919, les classes suivantes jusqu'à la date du 14 juin 1920.

Les Alliés, qui menèrent aussi des opérations de récupération via les *Salvage*, en Lorraine, en Champagne, Picardie et Nord Pas-de-Calais démobilisèrent encore plus rapidement que l'Armée française.

Les USA réembarquèrent l'essentiel de leur contingent présent sur le sol français courant 1919, moins d'un an après l'armistice du 11 novembre 1918[1002], alors que la IIIe Armée des USA fut créée pour occuper un secteur (autour de Coblence) d'Allemagne en rive gauche du Rhin (1919-1923) (cf. Section 10h du présent manuscrit). Le 19 mai 1919 toutes les divisions américaines combattantes, à l'exception de cinq d'entre elles restées sur le territoire allemand, reçurent l'ordre du retour aux USA ; elles furent relevées le plus rapidement possible. La IIIe Armée des USA fut dissoute le 2 juillet 1919, réduisant les forces américaines en Europe à 6 800 hommes[1003]. Cette démobilisation et ce rapatriement hâtifs furent des conséquences du désengagement des USA des affaires européennes suite à des soubresauts politiques internes au pays. Les démocrates du Président Wilson, qui firent entrer les USA en guerre, s'effacèrent face aux Républicains qui prônaient l'isolationnisme après la victoire de ces derniers aux élections de mi-mandat de 1918. Wilson, amenuisé par un AVC, n'étaient plus en mesure d'imposer son point de vue. Cette situation politique et diplomatique précipitât probablement la démobilisation des personnels américains encore sous les drapeaux.

Le programme de démobilisation des Britanniques, initialement indexé sur la valeur économique et la force de travail des soldats, souleva en Grande-Bretagne l'indignation. L'élection en décembre 1918, de Winston S. Churchill (1874-1965) comme nouveau Secrétaire à la Guerre à compter de janvier 1919, modifia les règles de la démobilisation en privilégiant les durées de services et les blessures de guerre. Les effectifs des forces britanniques déclinèrent de 3,8 million au moment de l'armistice à environ 900 000 fin 1919, en novembre 1920, ce nombre tomba à 370 000 hommes et on dénombra moins de 230 000 hommes en 1922.

Comme pour les Américains, ces hommes restèrent mobilisés sur le continent pour tenir un secteur, centré autour de Cologne, en rive gauche du Rhin d'une Allemagne partiellement occupée. Les Alliés démobilisèrent bien plus vite que la France, laissée seule face au défi de sa propre reconstruction.

6.8.4 Renvoi en Allemagne des Prisonniers de Guerre

Après la cessation des hostilités, la France maintint sur son sol les Prisonniers de Guerre (PG) allemands comme gage « humain » pour le paiement par l'Allemagne des réparations de guerre, au grand dam des Alliés qui avaient libérés les prisonniers en captivité dans leur camp dès la signature du Traité de Versailles du 28 juin 1919. Les Français faisaient là une entorse au droit international sur la guerre.

Ces PG formaient un réservoir de main-d'œuvre gratuite et corvéable à merci, affecté aux tâches les plus dangereuses en guise de « punitions », comme le désobusage, et une monnaie d'échange contre 400 000 travailleurs spécialisés (pour la reconstruction) réclamés par la France à l'Allemagne (un moyen de priver aussi l'Allemagne d'effectifs dans un contexte ou le pays possédait encore un potentiel militaire), *« Les prisonniers boches vont rentrer en bochie sans avoir fait le relèvement de ces projectiles, travail qui leur incombait, puisque c'est leur « Deutschland » qui est responsable des méfaits de la guerre[1004] ».*

[1002]Neumann, B. F., Makawicki, S. D. (2019). *Occupation and demobilization (1918-1923). The US Army Campaigns of Word War I Commemotaive Series*. Editor: Brian F. Neumann. Center of Military History. United States Army, Washington, D.C.

[1003] François, D., François, G. (2017). *I want you. Le Corps expéditionnaire américain. France 1917-1918*. OREP Editions, p. 296.

[1004] Bibliothèque nationale de France. *L'Eclair de l'est*, 9 septembre 1919

Pour ces raisons et pour pallier au manque de main d'œuvre, l'Etat-Major français fit transférer les PG vers les Régions Libérées depuis les camps situés à l'arrière. De janvier 1919 à janvier 1920, entre 250 000 et 310 000 hommes déblayèrent les ruines de près de 600 000 maisons, 20 000 usines, et débarrassèrent près de trois millions d'hectares de terres agricoles d'engins et matières explosibles[1005].

Mais le calcul de réduction de la contribution de la main d'œuvre militaire en la substituant par des PG, ne fut pas toujours heureux car en effet les PG devaient être gardés. De nombreuses évasions se produisirent à la faveur des travaux dans lesquels les PG étaient impliqués, en dehors de leur camp de prisonniers.

Les prisonniers restèrent en France jusqu'à la ratification du traité de Versailles par le Sénat le 11 octobre 1919, les derniers quittèrent le territoire en février 1920. Le Ministère de la Guerre et les Commandements départementaux des Prisonniers de Guerre des Régions Libérées (PGRL) avaient conscience de la précarité de cette main d'œuvre et que les tâches à lui confier devaient être réalisées le plus rapidement possible avant que cette force de travail corvéable ne disparaisse. Ainsi à Spincourt (département de la Meuse) où un vaste dépôt de rassemblement de munitions fut constitué dès novembre 1918 par l'autorité militaire, des solutions furent recherchées pour liquider ces stocks. L'immersion soit en mer du Nord soit dans la Manche fut étudiée. Le Commandement Départemental des PGRL de la Meuse souligna dans une note vraisemblablement datée de septembre 1919 que « *L'une ou l'autre de ces deux solutions réclame une réalisation d'autant plus prompte que la main d'œuvre des PG peut disparaître à brève échéance*[1006] ».

[1005] Medard, F. (2010). *Le prisonnier en 1914-1918. Acteurs méconnus de la Grande Guerre.* 1914-1918 éditions. p. 68.

[1006] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note au sujet du dépôt de munitions de Spincourt.

7. Résumé et conclusions de la Section 6h

La contre-offensive alliée, la reprise de la guerre de mouvement et la retraite allemande dès la fin de l'été 1918 rabattirent les cartes de la géographie des REG. Les REG ayant échappé à la récupération durant la Grande Guerre avant cette date se concentrèrent pour l'essentiel au droit et aux abords des anciennes lignes de front localement intensément bombardés lors des grands échanges d'artillerie. Il s'agissait des UXO (en surface et dans les sols), des matériels et matières explosibles non utilisés et abandonnés, épars, en amas ou en petits dépôts bien organisés.

Il n'existe que peu d'enregistrements archivistiques concernant les modalités avec lesquelles s'effectua la retraite allemande à l'automne 1918. Les armées allemandes balayèrent alors un large territoire entre la Marne et la frontière belge, coïncidant à leurs anciennes zones des armées, précisément là où l'Armée du *Reich* avait installé ses principaux dépôts de munitions. Afin de ne pas ralentir leur marche vers l'Allemagne, rendue difficile par (i) une configuration torturée d'un terrain qu'ils avaient eu même bouleversé, (ii) des carences logistiques et (iii) la fatigue et l'indiscipline dans les rangs, les Allemands se débarrassèrent de leurs matériels lourds et encombrants, de leurs dépôts de munitions en pratiquant la tactique de la « Terre brûlée », faisant exploser les dépôts ou les piégeant pour surprendre les Alliés, tandis que les wagons chargés de matériels de guerre en convois arrêtés en pleine voie, les caches de munitions installées dans les usines, crassiers et certaines ruines, furent délaissés. Des munitions et explosifs en vrac furent laissés sur place, sur leurs anciennes positions, et dans les systèmes souterrains de guerre de mines. Les Français en firent de même en abandonnant ces systèmes qui n'avaient plus raison d'être dans la conduite de la guerre de mouvement. Enfin, les Allemands précipitèrent aussi leurs projectiles dans des cours et plans d'eau, et des fossés. Les quantités abandonnées par les Allemands ne sont pas connues. Quelques chiffres locaux relatifs au territoire concerné par l'offensive allemande *Michael* du printemps 1918 sont éloquents et donnent l'ampleur des tonnages susceptibles d'avoir été abandonnés. Par leur poussée, les Alliés s'éloignèrent aussi rapidement de leurs dépôts et approvisionnements.

Les Alliés ignoraient tout de l'état de l'Armée allemande à l'automne 1918 et ses capacités à se battre, et n'entrevoyaient alors pas d'issue à la guerre, avant la fin du premier semestre 1919, au terme d'une offensive finale et décisive programmée par Foch en Lorraine. Les approvisionnements des dépôts de munitions de base et intermédiaires alliés continuèrent donc pour pouvoir maintenir une pression militaire sur les Allemands et pour la future offensive, alimentés par une production industrielle de guerre ininterrompue. A l'instar du déclenchement de la guerre d'août 1914, sa conclusion fut soudaine, inattendue et non anticipée. L'effondrement soudain de l'armée allemande surprit les Alliés. Les dépôts de munitions installés sur les réseaux d'approvisionnement logistique, dans les Etablissements de Réserve Générale de Munitions (ERGMu), dans les ports (pour les Alliés), dans les usines de munitions et les ateliers de chargements, étaient en pleine capacité de stockage. Avec l'arrêt brutal des hostilités le 11 novembre 1918, de telles quantités de matériels, estimées à 1 700 000 tonnes, ne trouvèrent plus de finalité immédiate et constituèrent des surplus de guerre, c'est-à-dire des matériels ne répondant plus aux besoins qualitatifs et quantitatifs des armées. La démilitarisation de l'Allemagne, le déclassement des munitions chimiques et de tranchées dans l'immédiate sortie de guerre et la poursuite des opérations de récupération contribuèrent vraisemblablement à l'inflation du tonnage des surplus, tandis qu'avec le temps, les chargements de ces engins en excès, obsolète et hors service (*Ammunition in Excess, Obsolete and Unserviceable* (AEOU)) se déprécièrent.

L'armistice du 11 novembre 1918 octroyait un délai de 31 jours à l'armée allemande pour se retirer de la rive gauche du Rhin. Mais les troupes françaises, impatientes de reprendre possession des territoires ancienne annexés d'Alsace-Lorraine (*Reichsland Elsass-Lothringen*, actuelle Alsace et département de la Moselle) ne laissèrent dans l'absolu que quatre jours entre leur entrée sur ce territoire et le départ des derniers Allemands. Par ailleurs l'armistice imposait aux Allemands d'abandonner leurs installations et matériels militaires intacts. Conformément aux clauses de l'armistice, les Allemands délaissèrent sur le Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL) leurs nombreux et parfois vastes dépôts (comme ceux du Bois de Lorraine et de l'Hôpital en Moselle, celui du MA3 et du *Hartwaldlager* en Alsace). Une liste des dépôts de munitions présents au début 1919, établie en date du 11 octobre 1921, fait état de 32 dépôts en Alsace totalisant 19 000 tonnes et de 17 dépôts mosellans renfermant 14 000 tonnes. Le territoire du *Reichsland Elsass-Lothringen* constitua pour les Allemands durant la guerre les bases arrières d'approvisionnement logistique du front des Vosges et de l'est lorrain. Cette position explique l'importance des tonnages abandonnés par les Allemands et la forte densité de dépôts de munitions.

La situation de la France et de la Belgique fut en novembre 1918 totalement inédite.

Dans l'ombre des ruines encore fumantes d'un monde fini, définitivement révolu au passé, en choses et pensées, un nouveau défi et une nouvelle épreuve, nés de la guerre, attendait les sinistrés, déplacés, et les autorités civiles comme militaires: reconstruire les zones dévastées au plus vite en assurant la sécurité des populations qui réinvestirent leurs terres, relancer l'activité agricole, économique. Personne, ni les populations, ni l'Etat n'était préparé à une telle nouveauté après le choc de la Grande Guerre dans le contexte d'une démobilisation, difficile, complexe, de millions d'hommes, des esprits, afin de glisser progressivement pour les anciens belligérants de la société et de la culture de guerre vers celles de la paix.

Cette guerre légua au temps de paix des ruines et des paysages désolés, mais aussi, en lien au recours par les belligérants à des moyens d'artillerie pharaonniques, des quantités invraisemblables de munitions et matières explosibles et agressives, devenues soudainement inutiles, mais surtout toujours dangereuses (restant en puissance d'explosion).

Ces Restes Explosifs de Guerre par milliers de tonnes, constellant les sols des anciens champs de bataille, dissimulés dans les ruines, les usines, encombrant les routes , chemins et fossés et saturant les dépôts à l'arrière entravaient le libre usage des sols agricoles, des usines, des voies ferrées dont l'économie avaient tant besoin dans l'effort de reconstruction. Ils constituaient en effet une menace réelle, pour les populations civiles qui les cotoyaient et les personnels en charge du relevage des ruines et de la remise en état des sols, la plupart non avertis aux dangers inhérents aux engins de guerre.

Enfin, certains dépôts de circonstances occupaient de vastes superficies sur des terrains, parfois privés, qui avaient été sèchement requisitionnés d'office pendant le conflit par les armées de tous les protagonistes du fait des circonstances et nécessités de la guerre. Le retour de la paix devait aussi être celui de la restauration de la libre jouissance des droits fonciers et de la propriété privée, nécessitant en prérequis la libération de ces parcelles des monceaux de munitions.

Au-delà des considérations et enjeux matériels et liés aux restes de guerre et aux recontructions, l'impact psychologique de la présence subie de ces constellations et amas de munitions et matériels de guerre sur les populations civiles, déplacées ou anciennement occupées et leurs dimensions symboliques ne doivent pas être occultés.

Cet arsenal hérité du temps de guerre était une source de préoccupations et d'angoisses pour ces populations, les engins prolongeant par leur présence matérielle et leur symbolique guerrière et meurtrière, la guerre dans un temps et des espaces à nouveau pacifiés, chez des populations qui n'aspiraient qu'à une nouvelle normalité. Le caractère anxiogène des restes de guerre était décuplé par le prisme déformant des représentations des armes chimiques, des « gaz » qui traversèrent la mémoire collective de l'entre-deux-guerres, puis réactivé dans et par les récits et les arts visuels à la fin des années 20[1007]. Les représentations étaient faussement alarmistes en réponse à une menace et à des risques réels qui étaient bien souvent ignorés. La survenue d'accidents (incendie, explosions, brûlures chimiques et intoxications) affectant biens et corps des individus, ou des communautés villageoises, parfois spéctaculaires, souvents mortels, relayés par voie de presse, attisèrent encore la puissance anxiogène des restes de guerre et le sentiment d'impuissance des populations face à cet héritage que les circonstances de la guerre leur avaient imposé. La presse et les correspondances administratives entre services usèrent d'une rhétorique guerrière pour décrire ces sinistres : exode, fuite, etc. Les munitions éparses abandonnées représentaient du fait de leur dissémination sur un vaste territoire, de leur armement lorsque tirés mais non explosés, une menace peut être encore plus sournoise, car moins visible, que celle inhérente aux grands dépôts de munitions « réglementés ». Particulièrement redoutables et redoutées : les grenades.

Les REG épars sur et aux abords des anciens champs de bataille et les vastes dépôts des surplus des *hinterlands* faisaient obstacle sur le chemin sinueux et complexe des reconstructions des villes, villages, des sols agricoles et des usines. Leur retrait et liquidation étaient non seulement des impératifs indiscutables, car des prérequis incontournables à toute reconstruction, mais devinrent aussi avec le temps des urgence.

Les engins de guerre, provisoirement abandonnés sur le terrain, dans des conditions d'entreposage inadaptées, exposés aux intempéries, aux écarts de température des cycles diurnes / nocturnes se déprécièrent rapidement, ces matériels n'étant pas conçus pour être conservés. Le temps joua en leur défaveur par l'accroissement de leur instabilité et par conséquence de leur dangerosité. Les munitions des surplus, en bon état, potentiellement encore utilisables au moment de la cessation des hostilités subirent avec le temps une obsolescence irreversible qui les transformèrent en déchets de guerre particulièrement dangereux (*Ammunition in Excess, Obsolete and Unserviceable* (AEOU)). Il fallait hâter les opérations d'enlèvement des engins de guerre abandonnés, pour accélérer les reconstructions, tant que le personnel possédant les compétences pour cela étaient encore présents sous les drapeaux, qu'il soit français, britannique ou américain, mais sous commandement unique français, et pouvait bénéficier d'une main d'œuvre des Prisonniers de Guerre, un vivier voué à disparaître avec leur renvoi en Allemagne dans le respect du droit international.

[1007] Kaufmann, D. (2017). « « Gas, Gas, Gas! » The Poison Gas War in the Literature and Visual Arts of Interwar Europe ».., In *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences*, *op. cit*. p. 169

Nombreuses sont les références historiographiques et études historiques académiques analysant, à différentes échelles et sous diverses focales thématiques, l'immédiate sortie de guerre au travers du prisme des bilans des destructions humaines comme matérielles, du travail de deuil, de la gestion de la mort de masse ou encore du relèvement des ruines dans le cadre des reconstructions. Des travaux comme ceux de Bruno Cabanes[1008], Béatrice Pau[1009], Stephane Audoin-Rouzeau et Christophe Prochasson[1010] ou encore d'Emmanuelle Danchin[1011] font référence. Le désobusage, terme généralement utilisé pour désigner les opérations de retrait et liquidation des REG des sols, et des surplus de munitions en excès, obsolètes et hors service, est invisible, tout juste mentionné en entre-filet dans ces écrits.

Pourtant, ces opérations furent de prime importance car elles constituèrent un prérequis incontournable aux reconstructions des Régions Libérées. Libérer les sols et ruines de France et de Belgique de ces restes et épaves de guerre, c'était aussi en finir enfin avec la guerre.

Personne, ni autorités militaires, ni autorités civiles, n'avaient pu anticiper cette situation, et n'avait été préparé à apporter en urgence des réponses par des actions concrètes aux problématiques posées, proportionnées aux enjeux dans un contexte post-traumatique de sortie de guerre.

Comment faire, avec quels moyens, par où commencer ? Le Service de la récupération français et les *Salvage* britannique et américain, déjà dépassés par la tâche durant la guerre, et toujours mobilisés dans l'immédiate sortie de guerre, étaient dans l'impossibilité de relever ce challenge, dans leur configuration et leurs moyens de 1918.

Les méthodes pratiquées, les moyens humains et matériels mobilisés et les organisations mise en place en France et en Belgique pour parer à l'impérieuse nécessité du retrait des engins et restes de guerre – en première urgence - dans le cadre de la sortie de guerre et des reconstructions font l'objet de la section suivante du présent manuscrit.

[1008] Cabanes, B. (2004). *La victoire endeuillée. La sortie de guerre des soldats français. 1918 – 1920*. Editions du Seuil.

[1009] Lemaitre, P. Béatrix Pau, B. Jauffret J.C. (2016). *Le ballet des morts: État, armée, familles : s'occuper des corps de la Grande Guerre.* La librairie Vuibert.

[1010] Audoin-Rouzeau, S. (2008). *Sortir de la Grande Guerre. Le monde et l'après-1918*. Editions Tallandier.

[1011] Danchin, E. (2015). *Le temps des ruines. 1914-1921*. Collection « Histoire », Presses Universitaires de Rennes.

Section 7h
1918-1919. La gestion des Restes Explosifs de Guerre dans les reconstructions. L'interventionnisme étatique de première urgence *post-bellum*

1. Introduction de la Section 7h

« Les travaux de récupération sont inséparables de ceux de reconstitution, puisque l'une prépare l'autre[1012] »

Reconstructions, remise en état des sols et gestion / récupérations des restes et épaves de guerre étaient des opérations indissociables et étroitement imbriquées dans leurs organisations, leurs objectifs et leur réalisation dans la sortie de la Première Guerre mondiale sur le front occidental, impliquant civils comme militaires. Cette section du manuscrit s'attache, sur la base des archives collectées et consultées, (i) à décrire et comprendre quels furent les cadres et contextes dans lesquels s'inscrivirent les opérations de récupération et de destruction des Restes Explosifs de Guerre, puis (ii) quelles organisations furent mises en place et par quelle(s) instance(s) ou autorité(s) pour répondre aux enjeux identifiés et décrits dans la section précédente, (iii) puis comment cette organisation sut évoluer sous l'effet de l'avancement des travaux de remise en état des sols, de la restructuration administratives et du partage des pouvoirs entre autorités civiles et militaires et (iiii) quelles furent les méthodes et les moyens techniques pour liquider ces REG indésirables. L'analyse historique de cette section du manuscrit a été volontairement bornée par d'une part la cessation des hostilités du 11 novembre 1918 et fin 1919, la récupération et le désobusage furent en effet repensés en terme d'organisation, de moyens alloués et d'objectifs, fin 1918, puis d'autre part fin 1919, date à laquelle, du fait notamment des démobilisations des personnels en armes, d'importants changements furent à nouveau opérés. Cette organisation temporaire de l'immédiate sortie de guerre, fortement imprégnée par l'interventionnisme étatique et le partage des tâches, responsabilités et pouvoirs, entre autorités militaires et civiles, préfigura par ses essais, réussites et erreurs, celle qui fut mise en place dès 1920 et qui fonctionna cahin caha durant près de 20 ans.

2. Réinventer la gouvernance civile dans la transition entre temps de guerre et temps de paix

S'ouvrit avec la signature de la fin des hostilités, une période d'un an environ (entre la signature du premier armistice du 11 novembre 1918 et l'entrée en vigueur le 10 janvier 1920 du Traité de Versailles[1013]), complexe au regard des travaux d'historiens, grise dans les archives, qui n'était plus la guerre mais pas encore vraiment la paix. Cette période fut le retour aux manettes du pays à reconstruire de l'autorité civile, reléguée au second plan par l'omnipotence à la tête de l'exécutif en France de l'autorité militaire durant la guerre. Cette période vit, via des organismes temporaires, parfois éphémères, glisser progressivement l'administration de la France de la sphère militaire vers la sphère civile ; les administrations courantes et ordinaires du temps de paix y retrouvèrent progressivement leur légitimité puis leur autonomie.

[1012] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Au GQG le 5 février 1919. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction sur les travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé.

[1013] Signé six mois auparavant au terme d'une conférence longue de 6 mois, tenue à Paris du 18 janvier au 29 juin 1919.

Ainsi les compagnies de chemin de fer furent démobilisées, jouissant de par leur statut privé d'accepter ou de refuser de véhiculer des matériels dangereux comme des obus datant de la Grande Guerre. « *L'administration des Eaux & Forêts » avait de nouveau le contrôle des arbres* ». « *On ne pouvait couper un seul sans l'autorisation du Ministre de l'agriculture*[1014] ». La gestion des rivières, ponts, routes et voiries fut remise dans le giron de l'administration des Ponts & Chaussées.

Les Maires, Préfets pouvaient à nouveau faire valoir leur droit de véto à des projets comme ceux d'édification d'usines et d'ateliers de démolition de munitions. Face à ces administrations autonomes aux contours et champs d'intervention flous, face à l'atomisation des responsabilités et à la dispersion des pouvoirs décisionnels plus aucune autorité centrale n'était capable d'arbitrer et faire rapidement des choix qui s'imposèrent de prime importance dans le contexte de la sortie de guerre et de la reconstruction.

L'Etat chercha à intervenir pour relever le quart nord-est de la France meurti en se dotant d'une nouvelle administration de la reconstruction marquée par un très grande complexité organisationnelle, comprenant différents ministères spécialement créés, une foison d'organismes d'études et de prospective (281 en février 1918[1015]), tantôt baptisés comités, commissions, offices ou encore services. L'objectif était de réglementer, administrer, contrôler la reconstruction. Ces besoins régaliens de la reconstruction avaient déjà été anticipés durant la guerre par Clémenceau créant un département ministériel unique le 16 novembre 1917 qui prit le nom de Ministère des Régions Libérées.

Une juridication administrative nouvelle fut ensuite instituée par la loi du 17 avril 1919, chargée d'établir les conditions de l'octroi et du montant des dommages de guerre (connue sous le nom de la « charte des sinistrés »). Un sous-secrétariat fut aussi créé *ex-nihilo* au sein du Ministère des Finances pour liquider les surplus militaires au terme de la guerre, le très justement nommé « Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks » . Enfin, « *le Préfet, en vertu d'un décret du 6 aôut 1919* » reçut autorité vis-à-vis des différents organismes pour mieux adhérer aux préoccupations et réalités des régions dévastées et accroître la réactivité des acteurs régaliens locaux dans la résolution de la reconstruction. Deux organismes, rattachés d'abord au Ministère de l'Agriculture et au Ministère du Commerce avaient pour mission dès fin 1917 d'organiser et administer la reconstruction agricole (avec l'Office de la Reconstitution Agricole, ORA) et industrielle (avec l'Office de la Reconstitution Industrielle, ORI) furent placés sous la tutelle du Ministère des Régions Libérées.

Comme démontré dans la Section 3h du présent manuscrit, la reconquête des terres agricoles libérées était déjà aux yeux du GQG, durant le conflit, une priorité dans l'organisation des zones des étapes et des armées. L'armée, par l'enlèvement des projectiles abandonnés, devait être facilitatrice de la reprise des labours. A compter de mi-1918, avec la perspective d'une cessation possible des hostilités, la remise en état des sols agricoles fut prise en charge à la fois par les civils et les militaires. La Circulaire du 14 juin 1918 du Ministère des Régions Libérées confiait la remise en état des sols agricoles pour la reprises des semailles et cultures au service du Génie rural, alors qu'en octobre 1918, la récupération militaire fut réorganisée pour mieux adhérer aux nouvelles conditions de la guerre et au redéploiement des Corps d'Armée. Un premier programme de travaux, comprenant l'enlèvement des ferrailles, barbelés, queues de cochon, la démolition de certaines fortifications de circonstances et abris, le remblaiement des tranchées et des trous d'obus, le nivellement du sol, fut élaboré et les chantiers engagés, au moyen de finances de l'Etat.

[1014] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. (1921). *Le Désarmement du sol. Le Figaro*, samedi 31 mai 1921.

[1015] Veziat, E. (2001). *Mémoire – Fédération des société d'histoire et d'archéologie de l'Aisne*, *op. cit*.

Ces travaux furent exécutés par des travailleurs coloniaux, des entrepreneurs, parfois aidés par les sinistrés eux-mêmes. Les travaux de remise en état des sols en France comme en Belgique débutèrent réellement à grande échelle dès l'armistice; ils furent à la hauteur de ce que cette guerre a été : dantesques et pharaoniques. Ils furent engagés dans un premier temps en France sous l'impulsion du Service des Travaux de Première Urgence (STPU) créé le 13 décembre 1918. Il devint en août 1919, le Service des Travaux de l'Etat (STE). Après dissolution du STPU « *Les travaux furent ensuite exécutés à la tâche par les ouvriers civils sous le contrôle des agents locaux. Le règlement des dépenses engagées à cette époque et restées impayées, a donné lieu à des abattements importants par le STE* [1016]».

Les missions assignées à ces services étaient (i) la remise en état du sol (comprenant le déblaiement des matériaux, le ramassage des projectiles qui n'auraient pas été enlevés par les soins de l'armée), (ii) la mise en culture des terres susceptibles d'être ensemencées, (iii) les premières réparations aux maisons endommagées (encore désignées par « la remise en habitabilité ») et l'installation d'abris provisoires pour les sinistrés / déplacés qui rentraient.

Le STPU dut assurer la coordination entre les multiples acteurs, civils comme militaires, locaux comme centraux, de la reconstruction (dont le service de la récupération sous direction militaire et en charge de la récupération des engins de guerre). Ce service fut placé sous la responsabilité et l'autorité d'un chef départemental. Cette idée fut louable dans ses intentions, mais catastrophique lorsqu'il fallut la mettre en œuvre concrètement sur le plan opérationnel. La main d'œuvre du STPU avoisinait les 300 000 travailleurs dont 200 000 Prisonniers de Guerre, des français civils recrutés localement, des travailleurs coloniaux et quelques 25 000 « Chinois »[1017]. La presse estima alors à 25 000 le nombre de travailleurs annamites sous contrat avec le STPU[1018]. Dans le département du Pas-de-Calais *« Les travaux commencèrent au début de 1919. 4 000 travailleurs chinois et 6 800 prisonniers de guerre furent employés au nivellement du sol*[1019] ».Il fut aussi fait appel à la force de travail de personnels immigrés provenant de Pologne, de Russie, du Maghreb, de la péninsule ibérique pour compenser le manque de main d'œuvre locale. Pour le seul Soissonnais (secteur du Chemin des Dames) (cf. Figure 156),19 015 personnes s'affairèrent à la remise en état des sols en date du 31 décembre 1919[1020].

Quelques chiffres peuvent être avancés pour illustrer l'ampleur des travaux engagés par le STPU / STE. A la date de mai 1919, le STE arracha dans ce secteur 3 600 000 m^2 de terrains initialement encombrés de fil de fer barbelé et combla 3 000 000 m^3 de tranchées. Pour le département de l'Aisne, ces quantités s'élevaient à 22 118 000 m^2 et 16 745 000 m^3[1021]. Dans l'Oise voisine, en six mois, 1 000 km de tranchées furent comblés et 1 500 000 m^2 de terrains lardés de barbelés débarrassés de leurs « ronces artificielles »[1022]. D'autres archives photographiques présentent ces travaux de remise en état des sols sur les chaumes des Hautes-Vosges, à l'emplacement de l'ancien champ de bataille du Lingekopf (cf. Figure 157).

[1016] Veziat, E. (2001). *Mémoire – Fédération des société d'histoire et d'archéologie de l'Aisne*, *op. cit*.

[1017] Journal des Régions Dévastées, n°10, 20 juillet 1919, p. 149. « La main d'œuvre chinoise » cité dans *Les travailleurs chinois en France dans la Première Guerre mondiale*. Sous la direction de Li Ma. CNRS Editions, 2012.

[1018] Clout, H. (1996). *After the ruins. Restoring the Countryside of Northern France after the Great War, op. cit.*

[1019] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. *Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927*. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. p. 479.

[1020] Bibliothèque nationale de France. Rio, A. (1920) *Lectures pour tous : revue universelle et populaire illustrée*. Juin 1920. p. 1257 – 1264. *Le Nord ressuscité*.

[1021] *Ibid.*

[1022] Archives départementales de l'Oise. *1914 – 1918. L'Oise au cœur de la Grande Guerre*.

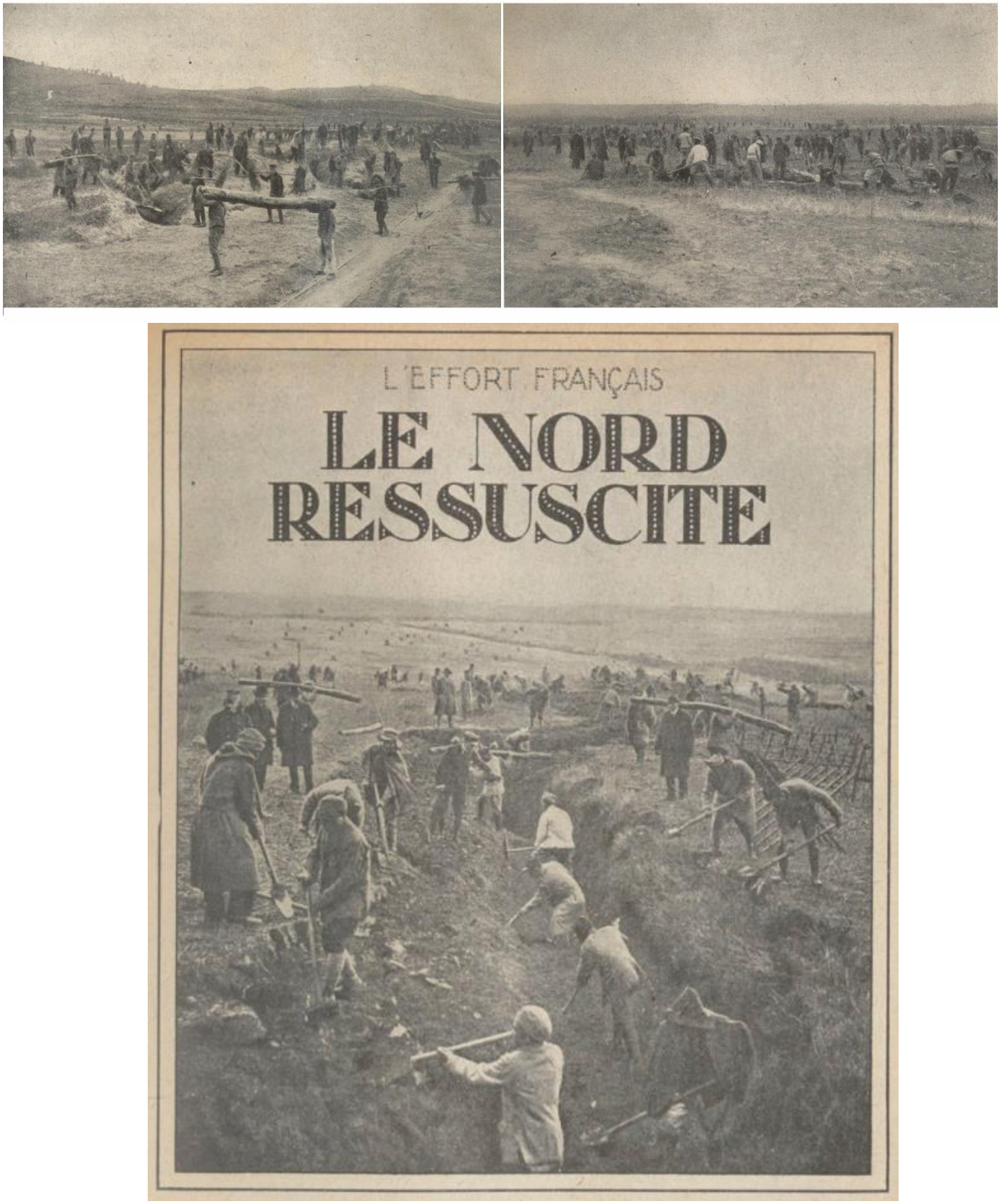


Figure 156 : Rare aperçu photographique panoramique des travaux de remise en état des sols par le STPU dans le soissonnais en 1919[1023].

[1023] Rio, A. (1920) *Lectures pour tous*, *op. cit.*

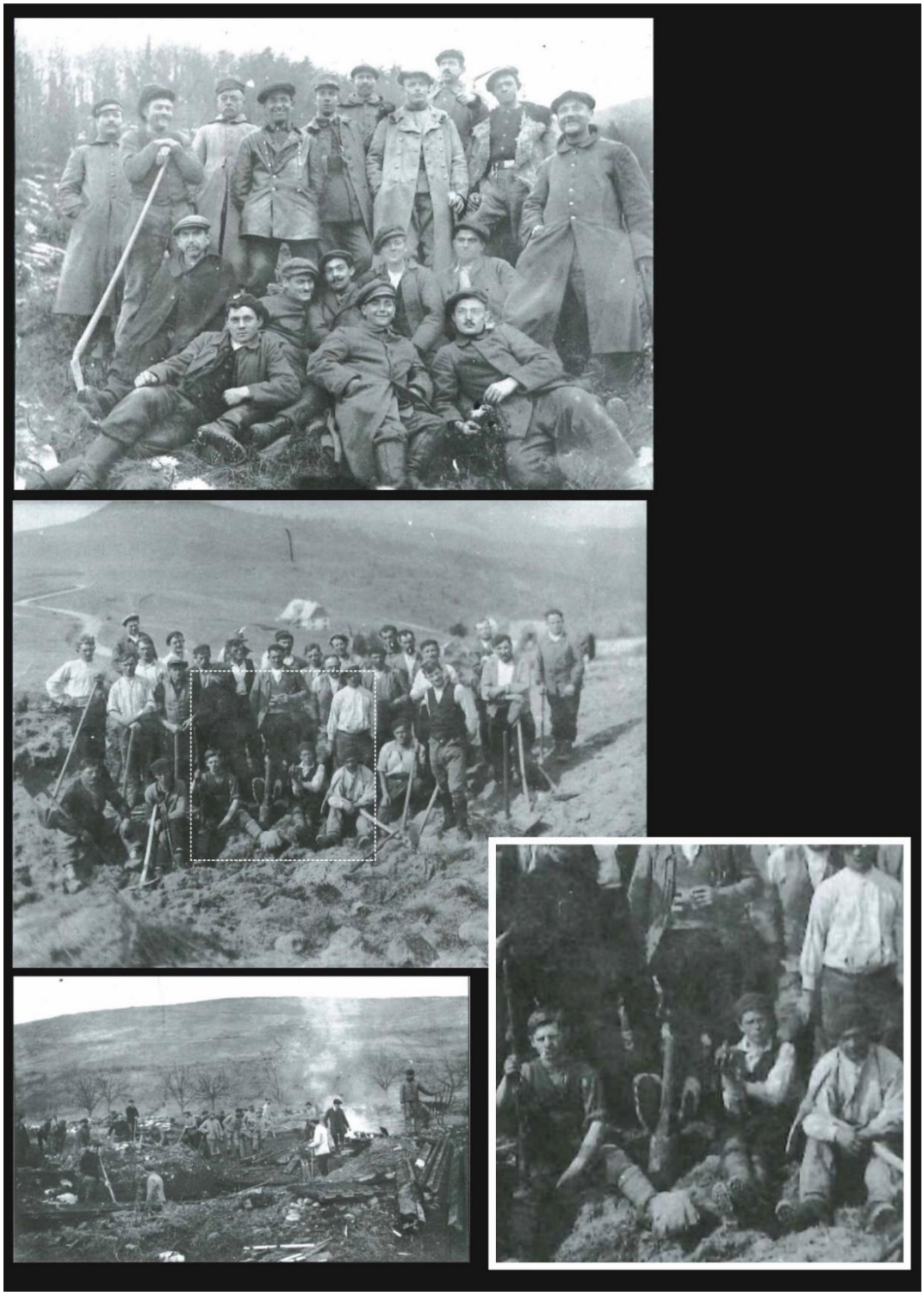


Figure 157 : Equipes s'affairant aux travaux de remise en état des sols sur l'ancien champ de bataille du Linge (positions françaises du Hurlin). En vignette, en bas à droite, des ouvriers exhibent un fusil (à gauche), une grenade à main à droite et au centre un projectile de tranchée français empennée de type 58T (« Crapouillot »)[1024]).

[1024] Hensel, F. (2013). *Le Lingekopf. De 1915 à nos jours. Destruction – Remise en état – Revalorisation d'un Champ de Bataille alsacien de la Première Guerre mondiale.* Jérôme Do Bentzinger Editeur.

3. La récupération dans l'immédiate sortie de guerre. Entre rupture et continuité (octobre 1918-janvier 1919)

« Au cours de la période qui a suivi immédiatement l'armistice, le désobusage a été poursuivi à l'aide de moyens militaires ; ces moyens constituèrent le service du désobusage lequel fut placé sous les ordres directs du Général Commandant l'Artillerie de la Région[1025] »

3.1. REBATTRE LES CARTES DE LA RECUPERATION AVEC LA CESSATION DES HOSTILITES

3.1.1 Adhérer à la nouvelle situation militaire

En octobre 1918, la récupération fut placée sous la responsabilité de l'Armée pour en décharger les Corps d'Armée en pleine poussée contre les forces allemandes en retraite. La cessation des hostilités du 11 novembre 1918 marqua un tournant dans la récupération du fait du changement radical dans la situation militaire sur le terrain.

La récupération par les militaires se poursuivit, sous la responsabilité et l'autorité du GQG. Les hommes du rang, accaparés par les combats de la puissante offensive alliée pour repousser les Allemands vers leurs frontières en 1918, restèrent encore officiellement et administrativement mobilisés tout en ayant déposés les armes. La démobilisation des combattants français de la Première Guerre mondiale, étalée sur une période de 19 mois, fut lente (cf. Section 6h du présent manuscrit).

Ce personnel ainsi que les moyens de transports logistiques se rendirent alors soudainement potentiellement disponibles pour d'autres tâches appartenant aux compétences militaires, notamment celles de la récupération. Les camps de PG étaient bondés d'une main d'œuvre corvéable à merci. Les Allemands avaient été aux yeux des Français, jugés seuls responsables de la guerre. A eux alors de réparer et « payer » par l'exécution de cette dangereuse besogne qu'était la récupération et la liquidation des restes de guerre. Le STPU mit des travailleurs à la disposition de l'autorité militaire chargée de la récupération et du désobusage[1026] notamment des indochinois. Par ailleurs, le découpage du territoire en Régions militaires du temps de guerre fut révisé pour adhérer à la nouvelle distribution géographique des Corps d'Armée.

Les armées françaises et alliées avaient progressé jusqu'aux abords des frontières allemandes de 1870 et en Belgique jusqu'à une ligne nord-sud entre Gand et Mons.

Les instances en charge de la récupération furent ainsi réorganisées dès la cessation des hostilités en considérant la disponibilité du personnel militaire, leur déploiement sur un vaste territoire repris aux Allemands « *afin de préparer le passage de ce Service au Commandement régional dans les meilleures conditions*[1027] ». La récupération et le désobusage glissèrent du Service centralisé de la récupération vers les commandements décentralisés des Régions militaires dessinées pour adhérer, autant que possible, aux découpages administratifs civils.

[1025] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Année 1930. 1er Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

[1026] *Journal des régions dévastées, n°2*, 25 mai 1919, p.27. Cité dans *Les travailleurs chinois en France dans la Première Guerre mondiale*. Sous la direction de Li Ma. CNRS Editions, 2012.

[1027] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n° 6.171/DA. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées du 19 novembre 1918. Signé : P.O. L'Aide-Major Général M. Duval.

3.1.2 Une récupération réglementée par de nouvelles notes et instructions

Notes et instructions émanant du GQG s'enchaînèrent très rapidement, pour parvenir à réorganiser la récupération cherchant, par « tatonnements » successifs, la meilleure alternative pour solutionner une situation à laquelle personne n'avait encore réellement été ni confronté ni préparé, ni les Français qui devaient remettre en état leur sol, ni les Alliés pour lesquels la question de la reconstruction n'était pas posée. A peine une semaine après la signature de l'armistice, la Direction de l'Artillerie (DA), à qui incombait de définir règles et cadres de la récupération des REG sur les anciens champs de bataille et zones des armées, redéfinit les objectifs et les conditions de la récupération des REG et des démarches à suivre par les personnels militaires en cas de découvertes d'engins de guerre, par une première note datée du 19 novembre 1918, (« *sur la récupération dans les anciens champs de bataille* » n° 6.171/DA[1028]). Cette note établit le cadre organisationnel et opérationnel de la récupération. Elle fut immédiatement suivie par une seconde n°327/A destinées aux Ire, IIIe et Ve Armées, datée du 28 novembre 1918. La note sur la récupération des munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918 fut centrale concernant la gestion des munitions anciennes. Elle s'attacha à définir les critères de ventilation des munitions récupérées, à conserver ou à détruire, et « l*es règles à observer pour le triage et la destruction de ces munitions* » […] « *pour les différentes catégories de munitions, celles qui doivent être récupérées et celles qui doivent être détruites ; elle indique en outre les règles à observer pour le triage et la destruction de ces munitions* [1029]». Elle compléta alors celle en vigueur (note n° 8.969/DA du 25 octobre 1918) qui encadra plus spécifiquement la récupération des munitions françaises dans le contexte particulier de la contre-offensive et la poussée alliée et de la perspective d'une possible fin des hostilités à l'automne 1918. Des officiers chimistes des Armées furent aussi détachés afin de coopérer à la récupération des munitions sur les anciens champs de bataille, vraisemblablement pour appuyer les artilleurs et les aider à trier les engins et/ou étudier les matériels ex-allemands[1030].

Le régime de primes incitatrices octroyées aux unités mobilisées sur le terrain pour la récupération en vigueur durant la guerre fut maintenu en exécution des prescriptions de la note 3.011/DA du 19 juillet 1917[1031] et aux instructions du Maréchal Foch du 9 janvier 1919 « *pour répondre aux prescriptions de M. le Ministre des Régions Libérées* », afin de stimuler les efforts de récupération par les hommes présents sur les anciens champs de bataille dans un contexte de démobilisation « culturelle » et de perte d'intérêt des troupes encore sous les drapeaux pour les missions relevant des questions militaires.

3.1.3 Objectifs de la récupération dans le cadre des reconstructions et priorisation des tâches

Les objectifs assignés à la récupération s'inscrivaient dans la continuité de ceux du temps de guerre mais s'en singularisaient en répondant aux besoins urgents des reconstructions, mais aussi à ceux de l'Armée, prise en tenaille entre les obligations de démobilisation et celles d'assurer par sa puissance la défense éventuelle du pays face à un ennemi toujours potentiellement dangereux et qui pouvait – pensait-on alors à l'Etat-major - retourner les armes contre la France. A la différence du temps de guerre, le personnel militaire, déchargé de ses missions de combat, était disponible pour la récupération afin de préparer la remise en état des sols mais, l'ampleur de la tâche de la récupération (au regard des tonnages considérables de matériels abandonnés) était telle que le GQG fut contraint de hiérarchiser les tâches en définissant des priorités.

[1028] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n° 6.171/DA, op. cit.

[1029] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. La note sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918. Signé : Le Général I.G.A, Herr.

[1030] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG du 30 novembre 1918.

[1031] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Rapport sur la marche du Service de Récupération (Mois de Janvier). GQG, le 30 janvier 1919. Signé : illisible.

Etaient considérés comme prioritaires 1) le retrait des engins de guerre et matériels dangereux des sols à vocation agricole, et la restitution des terres à leurs propriétaires, pour permettre la reprise des cultures au plus vite (*« Remise à la disposition des propriétaires des terres pour la culture, par entente avec les Administrations civiles (Préfets et Mairies)*[1032] *»),* et d'autre part, 2) la réappropriation par l'Etat des biens, matières et matériels dont il était propriétaire et laissés à l'abandon par les armées *(« Remise à la disposition de l'Etat du matériel lui appartenant et nettoyage du terrain de bataille*[1033] *»)*. Cette récupération à double finalité était aussi un préalable nécessaire à la reconstruction industrielle**,** en particulier dans les zones des Etapes où les usines, encombrées de munitions (caches), n'avaient pas été détruites et pouvaient rapidement être remises en fonction. Le général Régnier signa une note (n°8.806/DA) du 29 novembre 1918 destinée aux Groupes d'Armées dans le but de faire libérer au plus tôt les usines et manufacture encombrées par « *des dépôts de munitions ennemies, parfois considérables*[1034] ». Elle fit suite à la note pour M.M. les Commandants en Chef n° 6842 / C du 23 novembre 1918. Ordre fut donné aux Généraux Commandants d'Armée ou Directeurs d'Etapes de donner les instructions pour cette évacuation et de faire en sorte que les munitions retirées furent déposées en plein champ, aussi loin que possible de toute agglomération, dans des conditions qui offraient le maximum de sécurité.

La note du GQG du 28 novembre 1918 réaffirma les modalités de la récupération déjà énoncées un mois plus tôt en temps de guerre à savoir (i) « *le ramassage, le triage, la réfection, le regroupement des munitions d'infanterie et d'artillerie abandonnées sur le champ de bataille*[1035] », qu'elles soient françaises ou allemandes, (ii) « *le rassemblement dans quelques anciens dépôts de munitions d'armée, suffisamment vastes, bien desservis par voie ferrée et convenablement organisés au point de vue de la bonne conservation des munitions, de toutes les munitions françaises […] en bon état actuellement éparpillées dans un très grand nombre de dépôts et de centres de Livraison d'Armée* ».

Afin de libérer les terrains encombrés par les matériels et engins de guerre, des instructions furent donc formellement transmises aux armées afin de procéder à la récupération et au regroupement d'un maximum de REG éparpillés dans un minimum de dépôts bien organisés, sécurisés et susceptibles d'être gardiennés. La note du 28 novembre 1918 fixait les conditions du rassemblement des munitions françaises (choix des dépôts de rassemblement, besoins d'inventaires, etc.) et plaçait ces dépôts sous l'autorité et la responsabilité militaires. A ces fins, « *les Armées et Direction des Etapes disposeront de tout le personnel actuellement employé en service de tous les dépôts et centres de livraison dont elles prennent la direction […]* [1036]». Les munitions françaises ainsi réalloties pouvaient potentiellement être réutilisées, si nécessaire. Comme stipulé par la note du GQG du 25 octobre 1918, les munitions ex-allemandes collectées sur le terrain ou arrivant dans les centres de triage furent réservées et dirigées sur des centres de rassemblement de Groupe d'Armées spécialement dédiés à ces munitions.

Ainsi de vastes dépôts de rassemblement, bien desservis par des voies de communication furent créés ou ceux déjà existants, continuèrent à être exploités. Ces dépôts étaient donc impérativement positionnés là où les réseaux de voies de chemins de fer avaient été préservés des destructions à savoir dans les anciennes zones des armées.

[1032] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n° 6.171/DA. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées du 19 novembre 1918. Signé : P.O. L'Aide-Major Général M. Duval.

[1033] *Ibid.*

[1034] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note pour les Armées. Au GQG le 29 novembre 1918. Signé : P.O. L'aide-Major Général. Régnier.

[1035] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n°327/A du 28 novembre 1918. Signé : illisible.

[1036] *Ibid.*

Les opérations de rassemblement des engins transportables, initiées dès octobre 1918, se poursuivirent et s'amplifièrent donc posiblement une fois les combats cessés. Ce rassemblement d'engins de guerre ne pouvait s'envisager que si les conditions de sécurité pour leur manipulation et leur transport étaient réunies et garanties. Les opérations de rassemblement post-conflit se traduisirent donc par d'importants déplacements de matériels qui contribuèrent à modifier la géographie des Restes Explosifs de Guerre, en privilégiant leur concentration en des points donnés à l'écart des anciennes lignes de front sous contrôle de l'armée au détriment de leur dispersion sur de vastes territoires bombardés où les populations étaient exposées aux risques d'explosion**.**

3.1.4 Munitions à conserver versus celles à détruire

La récupération et le rassemblement des REG n'étaient envisageables que si ces matériels avaient été jugés transportables dans de bonnes conditions de sécurité par les personnels compétents en charge de ces opérations. Les REG intransportables, en puissance d'explosion, devaient être détruits pour ne plus constituer un danger. Les instructions pour le rassemblement d'engins transportables furent donc aussi assorties de consignes visant la neutralisation et la destruction des matériels dangereux parmi lesquels figuraient en priorité les projectiles britanniques d'artillerie de tranchée *Stokes*, les artifices éclairants et de signalisation, les grenades de toute nature, les bombes de tranchée, les obus détériorés, sans marques de chargement, les obus tirés et non éclatés, puis enfin tous les obus ex-allemands sauf les engins chimiques[1037]. Ainsi « *seront détruits : les projectiles d'artillerie et charges détériorées. Les munitions d'infanterie [ndlr : artillerie de tranchée] […] les grenades de toute nature, les artifices éclairants ou de signalisation* [1038]». Les destructions visaient clairement les matériels sensibles, instables, notamment ceux chargés de matières énergétiques chlorates ou perchloratées, et les munitions explosives ex-allemandes dont l'Artillerie française ne savait que faire. Les munitions chimiques allemandes étaient à rassembler sans distinction, les engins à chargements conventionnels devaient être quant à eux détruits.

Les engins rassemblés à conserver étaient quant à eux triés par nature, par calibre, par espèce (explosifs, à balles, spéciaux) par nature du métal constitutif (acier ou fonte aciérée), par nature de chargement explosif (*Schneiderite, Mélinite* paraffinée, etc.) et enfin par modèle (pour les fusées). Les obus spéciaux avec marques distinctives apparentes furent triés par nature de métal et numéro de chargement[1039]. La note référencée n°3.171 / GDE du 7 décembre 1918 s'attacha à définir « *les règles à observer pour le triage et la destruction de ces munitions* ».

[1037] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918. Signé : Le Général I.G.A, Herr.

[1038] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note. Au GQG, le 19 janvier 1919. Pour le général commandant en chef et par son ordre. Le général IGA. Signé : Herr.

[1039] *Ibid.*

3.2. DES SERVICES TEMPORAIRES DE PREMIERE URGENCE A LA PEINE. ORIGINES ET CONSEQUENCES D'UNE RECUPERATION DYSFONCTIONNELLE DANS L'IMMEDIATE SORTIE DE GUERRE

3.2.1 L'impatience des sinistrés et des services étatiques temporaires de première urgence à la peine

Tous les organismes, offices ou services temporaires étatiques comme le STPU et le STE, créés *ex nihilo* pour les besoins des reconstitutions agricoles, industrielles, urbaines, etc. furent critiqués avec virulence par les sinistrés et déplacés revenus chez eux ou attendant de pouvoir le faire. Quatre mois après l'armistice « *les réfugiés sont choqués et mécontents et leur déception peut croitre à un tel point que cela deviendra menaçant* »[1040]. L'absence de coordination entre les instances centrales et régionales, les autorités civiles comme militaires, fut systématiquement pointée du doigt.

Emergea une amertume des sinistrés à l'encontre de l'Etat. Le STPU recevait des ordres des Services de l'Architecture et du Génie rural, pour obtenir des matériaux il devait s'adresser aux Service des Ponts et Chaussées, pour les moyens de transports il se référait au Service des Transports et « *pour la main d'œuvre prisonnière, il ne pouvait, ni la déplacer, ni la fractionner sans le consentement de l'autorité militaire* »[1041].

Concrètement, outre l'impact délétère sur l'état d'esprit des sinistrés, les dysfonctionnements de ces services se traduisirent par des retards dans le désobusage, la récupération, et la remise en état des sols, prérequis incontournables avant tous les travaux de reconstruction. La survenance d'explosions accidentelles létales ou invalidantes au sein de la population qui eut à côtoyer des engins de guerre, dont ils ignoraient souvent la dangerosité, abandonnés par les armées, et non sécurisés ou pris en charge par les services de l'Etat, ne firent qu'exacerber critiques, l'amertume, et la dénonciation de l'inertie des services temporaires et de leurs fonctionnaires.

En août 1920 le député Revault se fit le porte-parole de la colère des sinistrés lorsqu'il rencontra Alexandre Millerand près de Verdun. Il accusa le gouvernement d'ignorer les plaintes des sinistrés et dénigra le Ministère des Régions Libérées considéré comme « *une organisation batarde* » sous dotée en personnels, avec trop de personnel dont les capacités étaient bien moindres que leurs responsabilités et trop d'administrateurs, pour certains talentueux mais pour la majorité incompétents[1042]. Il blâma le gouvernement de prolonger l'état de misère dans lequel se trouvaient plongées les populations du nord de la France. D'après l'observateur américain Herbert Gibbons « *Le premier hiver de la libération a été une cruelle déception. Les mesures prises par les autorités militaires furent si inappropriées et si dilatoires que les gens devinrent amers* » [...] « *Six mois après l'Armistice on serait tenté de douter de l'efficacité , de la capacité , et de l'aptitude d'un gouvernement à Paris d'entreprendre et de mener à bien la reconstitution des départements envahis* »[1043].

Mais le STPU était l'organe d'Etat exécutant en charge de la reconstruction et « *C'est […] à ce service que vont les malédictions des sinistrés. […]. C'est lui qui était en contact permanent avec les sinistrés, c'est lui qui s'est trouvé aux prises avec cette lourde tâche de la reconstitution* »[1044]. Ce service fut créé de toutes pièces pour mener des actions en urgence dans le contexte traumatique post-conflit. Cette tâche était non seulement urgente, mais aussi inédite et pharaonique.

[1040] Archives Nationales, cote F12 8030, Warren, De. E., Réorganisation des régions libérées, 27 mars 1919.

[1041] Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des régions dévastées. Pour la défense des sinistrés du Nord et de l'Est du 24 août 1919. Lettre ouverte à Monsieur le Ministre des Régions libérées*. Signé : STPU.

[1042] Bibliothèque nationale de France. *La Défense Agricole*. Les régions libérées, 29 août 1920.

[1043] Gibbons, H.A., (1920). *France and ourselves: interpretative studies 1917-1919* (New York: Century, 1920).

[1044]Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des régions dévastées*, *op. cit.*

3.2.2 Origine d'une récupération dysfonctionnelle

La note n°6135/DA du GQG du 5 février 1919 intitulée « *Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les Régions libérées* » qui fixa les nouvelles modalités de fonctionnement et d'organisation de la récupération, fut établie sur le constat puis l'analyse (par l'Inspection des Munitions et le GQG) dans l'immédiate sortie de guerre de dysfonctionnements de la récupération, qui ne répondait pas aux attentes de l'Etat-Major. Cette note débute par le constat suivant « *Il ressort des compte-rendu fournis par les Armées et des constatations faites sur place, que les divers travaux de récupération et de reconstitution, entrepris à la suite de la conclusion de l'armistice, n'ont fourni jusqu'alors tout le rendement qu'on doit en attendre*[1045] ».

Les compte-rendu des opérations de récupération transmis par le GQG au Maréchal de France furent à ce titre sans équivoque : « *Le Service de Récupération prévu pour la VI*[e] *Région (zone de Reims) n'a pu fonctionner encore faute de moyens d'action* [1046]» (30 novembre 1918) ou encore « *Le Service de Récupération de la zone de Bar-le-Duc étant en organisation, aucune opération de récupération n'a encore été exécutée*[1047] » (30 novembre 1918). Plusieurs raisons à cela peuvent être invoquées.

Failles et faiblesses structurelles et organisationnelles

Premièrement, le frein fut d'abord structurel, endémique à l'organisation de la récupération en particulier et plus généralement de l'administration mise en place à la sortie de la guerre. Elle s'avéra d'une grande complexité. Il ressort en effet des correspondances internes aux armées, au Ministère de la Guerre, mais également interministérielles, l'absence de coordination des actions diligentées par une grande diversité de parties prenantes, et une dispersion des moyens. Pour illuster cela, cet extrait d'archive est particulièrement démonstratif « *Le problème de la récupération et de la reconstitution tire sa complexité du grand nombre d'exécutants que l'on est obligé de faire participer aux opérations, et du grand nombre de services intéressés à une prompte solution. – C'est ainsi que le personnel chargé de récupérer les munitions est forcément distinct de celui qui s'occupe de reconstruire les villages démolis, parce que chacun d'eux a sa technique propre ; ces personnels eux-mêmes se séparent de celui qui est simplement appelé à ramasser sur le terrain des matériels divers, ou à combler des tranchées*[1048]*. […] Les exécutants ont à satisfaire les demandes provenant de diverses sources*[1049]

- *<u>Du Ministre des Régions Libérées</u> pour la remise en état des terres, des maisons, des localités ;*
- *<u>Du Ministre de la Reconstitution Industrielle</u> pour la réouverture des usines et la récupération de matières premières (produits métallurgiques, etc…) nécessaires à cette récupération, enfin ;*

- *<u>De l'autorité militaire</u> qui, par la voie de différents services, demande à rentrer en possession le plus rapidement possible – des munitions éparpillées ou entreposées sur le terrain, - des matériaux provenant d'anciennes organisations, - du matériel roulant, et – de tout autre matériel.*

Toutes ces catégories de travailleurs opèrent néanmoins le plus souvent sur le même terrain ».

[1045] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Cette archive se place dans un ensemble d'écrits / d'archives daté(e)s entre décembre 1918 et janvier 1919. p. 1.

[1046] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu des Opérations de Récupération pendant la 2e Quinzaine de novembre 1918. GQ G le 30 novembre 1918. Signé : illisible.

[1047] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu. Le Lieutenant-Colonel Toussaint, Commandant la zone de récupération à M. le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées Françaises. Le 30 novembre 1918.

[1048] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé.

[1049] *Ibid.*

Des récupérations françaises et alliés aux objectifs et contours géographiques flous

Deuxièmement, concernant l'autorité militaire, la récupération régionalisée et décentralisée était placée sous le contrôle et le commandement d'une part, côté français, des Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) de chacune des Régions militaires concernées (principalement les 1er, 2e, 6e Régions) et d'autre part, côté alliés, des Grands Quartiers Généraux (britanniques et américains). Les bordures des zones de récupérations entre Français et Alliés restèrent d'abord floues, notamment dans les secteurs du front, où les armées eurent à stationner en se côtoyant ou en se mêlant pour combattre : avec les Britanniques dans le Nord, le Pas-de-Calais et en Picardie, avec les Américains au nord de Verdun (secteur Meuse-Argonne) (Ier Armée) et aux confins des départements de la Marne et de l'Aisne (IIe Armée).

Ainsi au sujet du secteur Meuse-Argonne, occupée par la Ier Armée des Etats-Unis « *Il aura bientôt confusion au sujet des limites géographiques des zones de récupération des Américains et des Français*[1050] ». Le GQM américain, « *établi avec clarté en décidant que toutes les munitions de quelque nature qu'elles soient, qui ne sont pas surveillées par les troupes françaises à cette date, seront considérées comme récupérées* ». Chaque camp semblait avoir établi ses propres règles pour nettoyer le champ de bataille. Une solution pour coordonner la récupération française et le *Salvage* de l'AEF devait être trouvée « *Aucun froissement n'existe ici à ce sujet, mais il serait sage maintenant d'établir un accord à ce sujet*[1051] ». La confusion dans l'appartenance des matériels récupérés était aussi entretenue par le fait que les Américains furent dotés de matériels d'artillerie émanant des Français.

La complexité de la récupération dans les secteurs interalliés ne tint pas uniquement sur ces considérations géographiques mais aussi sur des divergences concernant les objectifs de ces opérations et sur le statut des munitions récupérées, bien que des officiers français aient été spécialement missionnés pour coordonner la récupération entre Français et Alliés (par la Mission française auprès de l'Armée britannique). Ces engins et matériels de guerre étaient « *des butins de guerre*[1052] », des prises sur l'ennemi pour les Britanniques là où les Français y virent des matériels propriété d'Etat et des engins dangereux à éliminer au plus vite, menaçant les populations civiles et entravant les impérieuses reconstructions sur leur sol.

La répartition des troupes britanniques sur le terrain visé par la récupération était aussi mouvante en 1918. Un exemple frappant des difficultés d'articulation des récupérations françaises et britanniques est celui de la Place de Maubeuge, dans le département du Nord, cette Place « *constitue un îlot français sur un territoire occupé actuellement par une Armée britannique*[1053] » et « *Jusqu'à présent, le service britannique de récupération n'a pu fonctionner, les troupes qui se sont succédées n'ayant fait qu'un court séjour dans la région* ».

La Mission française auprès de l'Armée britannique solutionna cette lacune. « *Dans quelques jours, le stationnement de la IVe Armée britannique (Q.G. à Namur), avec le Corps Australien (G.G. à Ham-sur-Heure, 11 km S. de Charleroi) permettra la mise en route de ce service*[1054] ». Enfin, les ressources humaines et matérielles (notamment en ce qui concerne le transport) allouées à la récupération étaient alors limitées et sous-dimensionnées au regard de l'ampleur de la tâche à exécuter.

[1050] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Traduction de la note de la Ier Armée. Transmis à M. Le Maréchal commandant en Chef les Armées du Nord et du Nord Est. Non daté (probablement fin 1918).

[1051] *Ibid.*

[1052] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Dunkerque, le 17 décembre 1918. P.O. le Chef d'Etat-Major, Guény.

[1053] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. D.E. de Dunkerque. Inspection des munitions, le 21 décembre 1918. Compte-rendu.

[1054] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. D.E. de Dunkerque. Inspection des munitions, *op. cit.*

Une démobilisation des esprits et le relâchement disciplinaire

Une autre difficulté peut être possiblement avancée pour contextualiser et expliquer l'apparente inefficacité de la récupération peu après l'armistice. Les troupes encore mobilisées et stationnées dans les zones des armées à l'armistice étaient lasses et leur état d'esprit certainement plus tourné vers la perspective d'une démobilisation prochaine que vers celles de la poursuite d'opérations dangereuses à des fins militaires en lien direct avec la guerre. Les soldats avaient donné de leur personne et glissèrent dans une démobilisation des esprits, s'éloignant de la culture de guerre, alors que la démobilisation militaire tardait « *La tâche est accomplie, nous sommes satisfaits* » dit un soldat de la Ve Armée « *Plus tard dans nos foyers, nous serons plus enthousiastes en relisant l'histoire actuelle, mais une chose nous domine tous pour l'instant, la lassitude […] Maintenant nous n'avons plus qu'un désir, rentrer chez nous et vivre la vie de famille, de tendresse, d'amour* »[1055].

La suspension des hostilités desserra l'étau d'obéissance dans lequel les soldats étaient pris ; s'ensuivit un relâchement disciplinaire. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées décrivit dans son rapport n°9 « *Constatations relatives à la récupération* » du 29 novembre 1918 une récupération opérée dans un grand désordre sur le terrain par les hommes du rang, s'adonnant même à des pratiques illicites. Ainsi « *Beaucoup [ndlr : de munitions] ont été pillées et démolies notamment les douilles chargées allemandes, le motif est de toucher des primes de récupération*[1056] ». L'Inspecteur des Munitions signala aussi les « *mauvaises habitudes prises par les troupes. On trouve des artifices à côté de matières inflammables, des caisses à grenades sont à proximité de cantonnements, etc. On prend l'habitude de tous côtés de brûler des fusées pour faire des feux d'artifice*[1057] » poursuivant « *Rentrant de nuit , j'ai assisté à ces feux d'artifice fusant de tous côtés, j'ai pu en particulier reconnaître à l'intérieur de Soissons le 24 novembre, on se livrait à ces pratiques en trois endroits différents* [1058]».

Ces dysfonctionnements et mauvaises pratiques vues de l'ordre militaire durant les opérations de récupération eurent pour conséquences (i) de voir les travaux et opérations de reconstruction ajournés ou retardés, en laissant les anciens champs de bataille encore « pollués » par de grandes quantités d'engins et matériels pyrotechniques, (ii) le maintien des risques et périls liés à la présence des engins de guerre abandonnés pour les populations de sinistrés aspirant à regagner leurs terres.

3.2.3 Conséquences

Les dépôts de rassemblement constitués par les armées dans le cadre de la récupération devinrent aussi paradoxalement source de danger. Le constat effectué par le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées lors de son inspection dans le secteur situé entre Montdidier, Saint-Quentin et Chalons – Rethel (dans l'Aisne, Ardenne et Champagne, 2e Région militaire) de janvier 1919 fut en ce sens sans appel, mettant en exergue les failles et manquements dans le bon fonctionnement opérationnel de la récupération qui « *se fait très mal* [1059]». « *Les centres de ramassage ont cessé, pour un grand nombre d'être gardés* » et *de facto* laissés libre accès aux populations locales, qui, attirés par les matériels stockés s'adonnèrent aux vols et pillages, de matériels inertes comme d'engins explosibles « *d'où dangers sérieux*[1060] ».

[1055] Cabanes, B. (2014). *La Paix et l'attente de la démobilisation. Finir la guerre. La victoire endeuillée. La sortie de guerre des soldats français. 1918-1920*., Editions du Seuil. p. 73.

[1056] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef (Grand Quartier Général – Artillerie), rapport n°9 « Constatations relatives à la récupération » du 29 novembre 1918.

[1057] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef, *op. cit*.

[1058] *Ibid.*

[1059] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à M. Maréchal de France, Commandant en Chef, GQG (artillerie). Nancy, le 18 janvier 1919.

[1060] *Ibid.*

Par ailleurs ces dépôts furent laissés « *sans protection contre les intempéries* [1061]» favorisant la dépréciation des matériels dangereux et démultipliant les risques d'accidents. Les « *errements* [1062]» de la troupe se traduisirent aussi par de nombreux accidents et des incendies comme celui signalé à Marle (département de l'Aisne) le 24 novembre 1918. Les raisons de l'abandon de la surveillance militaire des centres de ramassage tenaient dans les conditions chaotiques de la démobilisation avec des « *troupes […] en mouvement incessant*[1063] » et des difficultés des relèves entre les troupes initialement stationnées (artilleurs des batteries) par celles assignées aux opérations de récupération (batteries de tranchées, infanterie) qui « *ont été envoyées 6 semaines trop tard* [1064]». L'Inspecteur souligna que « *les Etats-Majors […] de récupération fixés par la note n° 6.171/DA du 19 novembre 1918 ne sont même pas constitués partout* » concluant qu'il « *est urgent de remédier à ces défectuosités* ». Une refonte de la récupération s'imposa donc.

4. Février 1919. Accélération de la récupération par celle des reconstructions

4.1. REFONTE DE LA RECUPERATION

4.1.1 Création d'un service spécial

Début 1919, afin d'accélérer la reconstruction matérielle et de parer aux difficultés rencontrées pour le débarrassage des anciens champs de bataille des matériels abandonnés, l'organisation de la récupération fut repensée *« Il y a lieu de leur donner une impulsion plus vigoureuse en mettant à profit les conditions nouvelles qui vont être réalisées, savoir*[1065] *:*

a) *Concordance des zones de stationnement des armées ou C.A.*[1066] *avec les territoires des Régions frontières ;*

b) *Réunion dans une seule main du Commandement territorial et du Commandement des troupes appelées à fournir les travailleurs.*

Le personnel militaire susceptible d'être mobilisé pour ces missions de récupération était dès lors disponible et stationné sur des territoires où il était pleinement justifié. L'organisation de la récupération fut alors intégralement repensée au regard de cette nouvelle situation militaire et plus largement dans le contexte des impératifs de la reconstruction urbaine, industrielle et agricole.

[1061] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef (Grand Quartier Général – Artillerie), rapport n°9 « Constatations relatives à la récupération » du 29 novembre 1918.

[1062] *Ibid.*

[1063]Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à M. Maréchal de France, Commandant en Chef, *op. cit.*

[1064] *Ibid.*

[1065] Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les Régions Libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919.

[1066] Corps d'Armée.

La nouvelle organisation fut encadrée par la note n°6135/DA du GQG du 5 février 1919 intitulée « *Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées* » qui fixa les nouvelles modalités de fonctionnement et d'organisation de la récupération, à laquelle fut dédiée un service spécifique « dans une seule main » qui prit le nom de « Service de la Récupération et de la Reconstitution ». *« La nécessité d'un ordre d'urgence dans la situation de ces divers besoins n'a pas pu être démontrée ; mais elle implique d'une part, l'établissement, dans une « cellule » de travail à déterminer d'un organe local d'exécution, qui oblige chaque service à préparer pour son compte et dans le cadre du programme général. En conséquence, l'organisation et l'exécution des travaux doivent être réalisés comme il est prescrit ci-après : « Le Service de la Récupération et Reconstitution dans la zone dévastée fonctionna sous la haute direction du Ministre de la Reconstitution des Régions libérées* »[1067].

Deux subdivisions furent créées début 1919 (i) un Service civil de la Reconstitution et de la récupération, avec à sa tête un Chef de service, représentant local de la Reconstitution des Régions Libérées et (ii) un Service militaire de la Reconstitution sous le commandement du Colonel Chef du Service qui reçut des instructions du Ministre des Régions Libérées et des Commandants des Corps d'Armée des Régions militaires concernées.

Par ailleurs, suite à un accord passé entre le Ministère de la Guerre et le Ministère des Régions Libérées un département transverse aux deux ministères, spécialement dédié à l'enlèvement et à la destruction des munitions, fut alors créé sous le nom « *Service du Désobusage* ».

Les équipes formant ce service furent placées sous les ordres des généraux commandant chacune des Régions militaires. Si le programme de travail assigné au service fut établi d'un commun accord entre l'Armée et le département de la Reconstruction du Ministère des Régions Libérées, l'Armée conserva la direction, le contrôle technique des opérations et l'entière responsabilité de leur exécution. Les artificiers du Service du Désobusage étaient principalement issus de l'Artillerie et du Génie du fait des compétences et expériences requises pour la démolition des matériels de guerre et engins de l'artillerie.

4.1.2 La récupération, une obligation réglementaire pour l'Etat. La Loi sur la réparation des dommages causés par les faits de la guerre

Le 17 avril 1919 fut votée la *Loi sur la réparation des dommages causés par les faits de la guerre*, parue au Journal Officiel de la République française, le 18 avril 1919. L'Article 60 de cette loi engagea la responsabilité de l'Etat en terme d'enlèvement des projectiles non explosés et de protection des populations au contact des engins et matières explosibles. L'Etat était aussi responsable des accidents et préjudices (dégâts sur les sols, les biens matériels, etc.) causés par les projectiles.

Dans la pratique, les obligations ainsi imposées à l'Etat comportaient (i) des investigations (sondages, piochages, etc.) en vue de découvrir les points où gisaient les engins, (ii) des enlèvements (récupérations) ou destructions sur places des projectiles découverts. Ces opérations étaient accompagnées par diverses mesures destinées à supprimer ou réduire les risques d'accidents ou dommages à des tiers et à fixer, le cas échéant, les bases de réparation à la charge de l'Etat. Les enlèvements pouvaient être effectués d'office lorsque les propriétaires des immeubles et terrains à désobuser s'opposaient aux opérations. La recherche et l'enlèvement des projectiles non éclatés pouvait ainsi, si nécessaire, s'effectuer « *d'accord avec la municipalité sans autorisation des propriétaires*[1068] ». Les engins et matières constitutives récupérées restaient propriété d'Etat.

[1067] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les Régions Libérées, *op. cit.*

[1068] *Journal Officiel de la République Française*, Cinquante et unième année, n°107. Loi sur la réparation des dommages causés par les faits de la guerre, Article 60, p. 4057.

4.1.3 Recadrage des missions et protocoles opératoires de la récupération et de la destruction des Restes Explosifs de Guerre

Les missions et protocoles opératoires du Service militaire de la récupération et du désobusage furent aussi à nouveau cadrés par une série de notes du GQG à l'attention des officiers dirigeant ces opérations. Les consignes furent rassemblées dans un guide produit par le GQG et amendé par la note n°21.624 du 14 mai 1919, intitulé « *Guide à l'usage des officiers chargés de diriger et de surveiller les opérations d'enlèvement et de destruction de munitions*[1069] ». L'Inspection Générale des Munitions diffusa ensuite ce guide durant la seconde moitié de l'année 1919 dans chacune des régions militaires concernées et les Parcs d'Artillerie à qui les opérations de désobusage et de récupération incombaient. Le général Maurin qui commandait l'Artillerie signa un rapport à la demande du Ministère de la Guerre intitulé « *Instruction provisoire concernant le stockage, le triage et la destruction des munitions dans les régions frontalières*[1070] » daté du 7 juillet 1919. Les instructions françaises rassemblées dans les différentes notes du GQG furent transmises aux alliés britanniques et américains (traduites littéralement en anglais mot pour mot), confrontés dans leurs secteurs respectifs aux mêmes problématiques que les militaires français. Les Français désiraient ainsi très possiblement poursuivre l'harmonisation et la mise en cohérences des actions de récupération et de désobusage déjà engagées durant la guerre et conserver le contrôle de la bonne marche et des bonnes pratiques des opérations de remise en état des sols nationaux.

4.1.4 Articulation entre actions civiles et militaires

Les opérations conduites par le Service de la Récupération et de la Reconstitution étaient indépendantes des travaux « d'utilité publique » (comme ceux menés par le STPU) conduits par l'Etat. Pour ne pas interférer négativement avec leurs travaux et opérations « *il est cependant indispensable que ce service soit renseigné sur leur stationnement et le programme de leurs travaux, pour régler l'emploi de son personnel de manière à éviter toute gêne réciproque*[1071] ». A l'instar des coopérations civiles et militaires mises en place durant la guerre pour opérer la récupération, l'autorité militaire fit en sorte que des liaisons intimes entre autorités militaires et civiles et notamment municipales soient maintenues pour optimiser les opérations, l'autorité civile étant *« seule à même de fournir aux exécutants militaires un plan des travaux , appropriés aux besoins de la région et d'assurer une certaine continuité dans l'exécution de ce plan*[1072] *».* L'autorité civile repérait les REG à évacuer, transmettait des consignes au Service de la Récupération pour que son intervention adhérât au mieux aux réalités de la situation sur le terrain et aux besoins du moment dans le cadre de la reconstruction.

4.2. UNE MAIN D'ŒUVRE MILITAIRE ET CIVILE COSMOPOLITE

Le Service militaire de la récupération disposait d'une main d'œuvre faite de travailleurs militaires : travailleurs coloniaux, batteries de tranchée, unités de transport, et de tous les éléments prélevés sur les grandes unités stationnées sur le territoire mises temporairement à disposition. « *Chaque Commandant de Région affecte les éléments disponibles prélevés sur les Grands Unités, Services et éléments d'Armée, et, en outre, tous les éléments mis antérieurement par le Maréchal Commandant en Chef à la disposition des Armées ou autant que faire possible, toutes les affaires de reconstitution et de récupération sont traitées à l'Etat-Major de l'Armée-Région ou du CA-Région par un bureau unique spécialisé dans ces questions, et assez fortement constitué pour pouvoir envoyer fréquemment des officiers dans la zone des travaux* [1073]*».*

[1069] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 2586. Guide à l'usage des officiers chargés de diriger et de surveiller les opérations d'enlèvement et de destruction de munitions.

[1070] *Ibid.*

[1071] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote cote 16 N 2586. GQG janvier 1919. Note. Signé : Vinot.

[1072] *Ibid.*

[1073] *Ibid.*

La répartition de cette main-d'œuvre militaire était du ressort du Colonel Chef du Service et fut fonction d'un programme de travail qui était transmis par le représentant local du Ministre de la Reconstitution.

Comme elle côtoya une main-d'œuvre de travailleurs civils rattachés au Ministère des Régions Libérées et dépendant du Service civil de la Récupération, une étroite coordination de l'ensemble des personnels était impérative « *il est de toute nécessité que les deux personnels, tout en opérant sous les ordres directs de leurs chef naturels – travaillent en liaison*[1074] ». Ce personnel était recruté, payé et logé par le Ministère des Régions Libérées.

Les officiers en charge de la récupération étaient dotés sur le terrain d'une certaine autonomie dans le choix techniques pour le groupement, le lotissement, les destructions des munitions à rebuter tout en se conformant « *pour l'ordre d'urgence du nettoyage des terrains aux ordres qui lui seront donnés par le Colonel Chef du Service Militaire de la Reconstitution et de la Récupération* [1075]».

Du fait de la rareté de la main d'œuvre militaire spécialisée (et en particulier des artificier et artilleurs possédant les compétences nécessaires au tri des munitions) et afin de parer au plus urgent, des personnels furent détaché d'une région militaire à l'autre. C'est ainsi, par exemple, qu'une équipe d'artificiers de la 6e Région militaire fut mise à disposition par le Ministère de la Guerre pour prendre en charge les engins de guerre découverts à la faveur des travaux de première urgence dans l'Oise.

Les personnels militaires du Service du Désobusage furent aussi aidés dans leur périlleuse mission par une main d'œuvre civile, de travailleurs indo-chinois (annamites), arrivés en France durant le conflit, sous contrat entre l'Etat français et la Chine pour les nécessités de l'effort de guerre. Ainsi « *6 000 Indo-Chinois disponibles sont à affecter à la Direction des Etapes de Dunkerque pour le Service de Récupération*[1076] ». Le roman de l'écrivain combattant Dorgelès « *Le Réveil des Morts* » (1923) s'ouvre avec la description de destruction de grenades par les annamites vers le Chemin des Dames « *Le vent emportait l'étoile rouge à la dérive. Elle dut tomber dans la rivière, juste devant l'ancienne tranchée qui suivait la berge. Comme si les Chinois avaient voulu encore ajouter à l'illusion et animer de bruit cette vision de la guerre, on entendit, du côté de leur camp, éclater des grenades*[1077] ». L'Artillerie fut aussi aidée dans ces opérations de récupération et de désobusage par la main d'œuvre des Prisonniers de Guerre (PG) allemands avant leur renvoi en 1920 en Allemagne. 1 800 travailleurs annamites et les PG s'affairèrent par exemple au rassemblement des engins contenus dans 15 dépôts ex-allemands, totalisant 3 745 tonnes, dans la région d'Arras (département du Pas-de-Calais). Le *Salvage* britannique fit aussi appel à cette main d'œuvre. Le service de la récupération de la IIIe Armée britannique stationnée dans la 2e Région militaire (secteur de la Somme notamment) employa ainsi « *25 000 chinois ou P.G.*[1078] ».

L'Artillerie fit aussi appel à une main d'œuvre faite de travailleurs immigrés. A Sissonne, dans le département de l'Aisne et à l'emplacement de l'actuel grand camp militaire, un vaste centre et dépôt de rassemblement fut constitué.

[1074] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919. p. 5.

[1075] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées, *op. cit.*

[1076] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 2586. Note pour la section main d'œuvre du 20 décembre 1918. P.O. Le Sous-Chef d'Etat-Major. Signé : Colson.

[1077] Dorgelès, R. (1923). *Le Réveil des Morts*, *op. cit.*

[1078] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Paris, le 5 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef les Armées Alliées [ndlr : Foch]. Signé : Le Général Chef du Cabinet Militaire. Mordacq.

Y affluèrent 1 000 à 1 800 tonnes de munitions par semaine. Le personnel affairé aux manipulations et entreposages des engins dépendait du Parc d'Artillerie de la 2e Région militaire et comprenait outre 10 Français, 116 chinois, 3 algériens et un important contingent de 253 travailleurs polonais[1079].

La Commission Centrale de la Récupération qui pilotait les opérations de récupération et de désobusage en Belgique fit appel pendant plus d'un an, pour la remise en état du camp de Béverloo (actuel grand camp d'exercice de l'Armée belge), ayant renfermé 9 000 tonnes de munitions, à près de 200 « disciplinaires[1080] » (possiblement du personnel militaire ayant fait l'objet de sanctions disciplinaires) de la 10e Compagnie Spéciale de Béverloo invoquant que l'usage de cette main d'œuvre par ailleurs inoccupée était doublement avantageux, d'abord financièrement puis par l'accélération des opérations par cet afflux de main d'oeuvre« *L'économie ainsi réalisée pourrait être évaluée à 10 000 frs par semaine et le travail pourrait être poussé plus loin, de façon à rendre au camp de Béverloo sa configuration primitive[1081]* ». Le recours à cette main d'œuvre fut maintenu malgré les évasions qui se produisirent « *malgré une surveillance sévère et active de la part des Officiers et Gradés du Corps[1082]* ».

4.3. TENSIONS INTERALLIEES ET LA DEMOBILISATION DES *SALVAGE* BRITANNIQUE ET AMERICAIN EN FRANCE

Dans le Nord et le Pas-de-Calais, l'enlèvement et la destruction des engins explosifs furent assurés par l'Armée britannique jusqu'en septembre 1919. Fin 1919, le contingent britannique encore mobilisé fut amputé de 64% de ses effectifs. Une phase de transition s'opéra sur les secteurs britanniques pour le passage du relai du *Salvage* au Service de la récupération. Les états-majors des armées françaises et britanniques se concertèrent sur cette transition, notamment dans la Somme « *Etant donné l'importance primordiale de tous ces problèmes de récupération et de reconstitution dans les régions envahies[1083]* » et « *le Major Anglais qui l'a mise sur pied [ndlr : la récupération dans la IIIe Armée] a signalé que la démobilisation Britannique et le retrait des troupes, peuvent entraîner un ralentissement, sinon un arrêt* ». Ils demandèrent que soient maintenus le plus longtemps possible les moyens britanniques alloués aux récupérations. Les Américains quittèrent le sol français très rapidement, parachevant tant bien que mal et au plus vite le grand cimetière militaire de Romagne-sous-Montfaucon en Meuse[1084].

Les rares archives relatant des relations entre le GQG français d'une part et les GHQ (*Great Headquarter*) britannique et GQM (*Great Quartermaster*) américain d'autre part au sujet de la récupération semblent montrer un climat de tension entre les Alliés à ce sujet.

[1079] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8N 92. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'Administration de l'Armée. 2e et 13e Régions. Service de l'Artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport Particulier fait par M. Gras, contrôleur de 2e Classe.

[1080] Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Royaume de Belgique. Commission Centrale de la Récupération. Le Lieutenant-Général Président de la CRR, Bruxelles au Ministre de la Défense Nationale. Bruxelles le 28 juillet 1921. Signé : Le Lieutenant – Général Président (en mission (manuscrit) Kysen.

[1081] *Ibid.*

[1082] Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Le Lieutenant-Colonel, commandant le Corps de Discipline au Ministre de la Défense Nationale, Cabinet. Bruxelles, le 30 juillet 1921. Signé : illisible.

[1083] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16N 2586. Récupération et reconstitution dans les Régions Libérées. Paris, le 5 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef les Armées Alliées [ndlr : Foch]

[1084] N. Cuzback, communication personnelle.

Foch, commandant en Chef les Armées Alliés, envoya un signal clair au Général Chef de la Mission Militaire Française auprès du GHQ britannique, que les Français ne sauraient accepter « *les méthodes dangereuses qui seraient employées par des détachements anglais, chargés de la récupération, pour se débarrasser des munitions non éclatées* » à savoir, dans la 1er Région militaire de d'enfouir les munitions dangereuses « *à 3 mètres de profondeur, afin d'écarter tout danger pour la culture*[1085] » .

Le 23 mars 1919 Foch adressa un courrier à Pétain, commandant les Armées Françaises de l'Est au sujet des « *procédés employés par les Américains dans la région de Droitaumont, Conflans, Chambly, Mars-la-Tour pour détruire les munitions abandonnées par les Allemands*[1086] » faisant suite à des plaintes des habitants ayant eu à subir des dégâts matériels aux habitations comme aux voies ferrées.

Les récupérations opérées par le Service français sur le territoire occupé par les armées alliées furent précédées d'une détermination du matériel revenant à chaque armée, après accords entre représentants des autorités françaises, britanniques et américaines.

Cette période du premier semestre 1919, fut celle des tensions et différends entre la France et ses anciens Alliés sur la question des réparations de guerre dans le cadre des conférences préparatoires au Traité de Versailles du 28 juin 1919. Il est vraisemblable que les relations et la qualité de la coopération entre la France et ses anciens alliés concernant la remise en état du sol et de son désobusage furent dégradées et mises sous tension par le contexte géopolitique tendu et le climat diplomatique délétère qui entourèrent les conférences préparatoires. Les archives ne précisent pas si la question du partage (i) des fruits de la récupération et/ou (ii) des secteurs géographiques de récupération attribués à chaque Armée entrèrent ou non dans les pourparlers lors des conférences pour la paix.

[1085] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. Récupération de projectiles non éclatés. Paris, le 25 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre (Cabinet militaire) [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées.

[1086] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Commandement en chef des Armées Alliées. Etat-Major Général. Au GQGA le 23 mars 1919. Le Maréchal Foch, Commandant en chef les Armées Alliées (DGCRA) à Monsieur le Maréchal de France Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est.

5. L'exceptionnelle accumulation de projectiles dans le canton et en forêt de Spincourt. L'exemple des opérations de rassemblement des REG des 2e et 6e Régions militaires en Meuse

5.1. INTRODUCTION. LES DEPOTS DE RASSEMBLEMENT

Nous venons de voir que les armées avaient fait de la récupération des matériels de guerre abandonnés leur priorité pour libérer des territoires voués à la reconstruction. Les engins de guerre récupérés étaient soit détruits sur place s'ils étaient jugés intransportables pour des raisons de sécurité, soit acheminés vers des sites de triages et de là orientés vers des dépôts de rassemblement ou centre de réfection. Les munitions françaises et alliées d'une part et allemandes d'autre part furent rassemblées séparément, et toujours entreposées à l'écart des habitations. Les Groupes d'Armées (GA) organisèrent un ou plusieurs centres de rassemblement de munitions allemandes (Groupe d'Armées du Nord (GAN), Groupe d'Armées du Centre (GAC), Groupe d'Armées de l'Est (GAE), Groupe d'Armées des Flandres (sous commandement belge) et le *British Expeditionary Forces* (BEF) (sous commandement anglais). Ce rassemblement permettait de centraliser les munitions et de les garder efficacement.

Des exemples de grands centres de rassemblement identifiés dans les archives sont ceux de la Faisanderie en forêt de Compiègne pour les engins conventionnels et celui du Camp de Chalons[1087] pour les projectiles à chargement chimique[1088], ou encore ceux de Trélon (département du Nord), Sissonnes (département de l'Aisne), du MA3 à Illkirch-Graffenstaden (département du Bas-Rhin), du Bois de l'Hôpital à l'est de Metz (département de la Moselle), de Spincourt (département de la Meuse). Des centres de rassemblement de munitions ex-allemandes furent aussi installés à Morains-Aulnay (ancienne commune du département de la Marne, actuel Morains-le-Petit) et de Confremeaux (département de l'Aisne)[1089].

Certains dépôts de rassemblement, comme celui de Spincourt ou encore de Trélon, pouvaient renfermer des millions de projectiles.

Je me propose de développer l'historique du rassemblement exceptionnel des munitions chimiques provenant des 2e et 6e Régions militaires en forêt et dans le canton de Spincourt dans le nord meusien. Ce choix repose sur (i) une bonne documentation des opérations de rassemblement, (ii) l'importance des activités de destruction de REG à l'échelle industrielle qu'ils générèrent dans l'entre-deux-guerres et (ii) l'ampleur des dégradations de la qualité des sols et des eaux, encore actuellement perceptibles et mesurables, causées par ces dernières. Cet exemple est aussi éclairant sur les critères sur lesquels se basa l'autorité militaire pour le choix des centres de rassemblement.

Le département de la Meuse était partagé entre la 2e Région militaire (nord du département) et la 6e Région (sud du département). La 2e Région comprenait le nord des départements de la Meurthe-et-Moselle, des Ardennes, de l'Aisne, l'intégralité du département de la Somme, et la moitié ouest du département de l'Oise.

[1087] Actuel camp « Cential » de Suippes dans le département de la Marne.

[1088] Archives départementales de l'Oise. Bonnard, J.Y. Ricard, B. 1914-1918. L'Oise dans la Grande Guerre. Actes du colloque organisé par le Conseil général de l'Oise et la Ville de Noyon, Noyon, 24-25 octobre 2008. p. 188.

[1089] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GG, le Général de Division Maistre, Commandant le Groupe d'Armées du Centre à Monsieur le Général Commandant en Chef du 30 octobre 1918. Signé illisible.

Cette région présente la particularité de regrouper des secteurs français, britanniques, américains durant la guerre. La 6e Région regroupaient par ailleurs la partie médiane du département de la Meurthe-et-Moselle, le sud des départements des Ardennes et de l'Aisne, la moitié est du département de l'Oise, et l'intégralité du département de la Marne (cf. Figure 158).

Figure 158 : Découpage du territoire national en région militaires (en 1914)[1090].

[1090] Labarbe, B. (2019) http://raymond57ri.canalblog.com

5.2. MUNITIONS CHIMIQUES DE LA 2E REGION MILITAIRE : RASSEMBLEMENT EXCEPTIONNEL DANS LE CANTON DE SPINCOURT (MEUSE)

Dès le 17 novembre 1918, soit seulement une semaine après l'armistice, la constitution d'un dépôt de rassemblement de munitions fut ordonnée par les «*Armées alliées*[1091] » dans le canton de Spincourt, à 20 km environ au nord-est de Verdun, entre Spincourt et le village de Muzeray[1092]. Les terrains furent sèchement réquisitionnés d'office par les militaires sans aucune forme de demande d'autorisation préliminaire et d'indemnisation ce qui froissa les autorités civiles[1093] « *l'administration préfectorale a protesté vivement contre l'accumulation d'obus toxiques [...] à proximité de la commune de Spincourt*[1094] ». Ces terrains agricoles, à proximité de la ferme de Rampont à Muzeray, étaient notamment la propriété de Mr. Didion, maire de Muzeray et conseiller général de la Meuse. Un important dépôt de matériel et de munitions ex-allemands était déjà présent en 1918 à cet emplacement, à proximité de l'actuelle ferme de Rampont (cf. Figure 160). Le dépôt de Spincourt devint le centre de rassemblement des munitions chimiques ex-allemandes récupérées dans la 2e Région militaire en application des instructions de la note du GQG n°6.171 / DA du 19 novembre 1918. Les engins provenaient de récupérations notamment situées en Belgique (région de Couvin et de Florenville), dans les Ardennes. A noter que l'entreprise Clere & Schwander demanda par l'entremise de l'Office de Liquidation des Stocks la cession des projectiles récupérés dans les secteurs de Reims (département de la Marne), Soissons, Chauny, Laon (département de l'Aisne) et Asfeld (département des Ardennes) et des engins qui devaient être démolis, en s'engageant par ailleurs à réaliser ces destructions suivant « *un certain prix*[1095] ». Une conférence interministérielle se tint à Paris le 19 mars 1919 afin de statuer sur cette demande « *et de fixer, avec les modalités d'application, les conditions et les clauses à imposer aux adjudicataires afin de sauvegarder, contre tous les risques possibles, les intérêts de l'Etat et des tiers*[1096] ». Les archives consultées ne précisent pas si cette demande fut acceptée, mais Clere & Schwander fut rendu adjudicataire par le Ministère des Finances, Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stock (représenté par Paul Morel), d'un contrat intitulé « *Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt* » daté du 17 septembre 1919[1097]. L'Article 3 de ce contrat précise qu'il visait la démolition d'obus toxiques français comme étrangers. Les obus acheminés à Spincourt étaient allemands, britanniques et français, ce qui est confirmé par la collecte sur le terrain de fragments ayant appartenus à des munitions chimiques des trois anciens belligérants. Ces observations de terrain et les archives montrent qu'il s'agissait majoritairement de REG ex-allemands mais aussi d'engins britanniques, à chargement chimique (*Croix bleue*, *Croix jaune*, *Chloropicrine*, etc.).

[1091] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Monsieur le Préfet de la Meuse à Monsieur le Général Commandant du 6e Corps d'Armée. Bar-le-Duc, le 27 mars 1920.

[1092] Le dépôt est établi sur le champ de bataille d'une des premières confrontations armées entre armée française et prussienne de la guerre de 1870, la bataille de Spincourt du 18 août 1870.

[1093] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Réorganisation de la vie locale dans les Régions Libérées. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Général Commandant le 6e Corps. Bar-le-Duc, le 2 avril 1920.

[1094] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Note à Monsieur Chastel, Secrétaire Général. Bar-le-Duc, le 2 avril 1920. Signé : le Secrétaire Général à la Reconstitution.

[1095] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à M. le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées françaises de l'Est. Paris le 13 mars 1919. Signé : pour le Président du Conseil, Ministre de la Guerre et sur son ordre. Le Général Directeur de l'Artillerie. Illisible. Dépêche remise au Général Mangin et au Commandant Colson (manuscrit).

[1096] *Ibid.*

[1097] Centre des Archives Economiques et Financières, site de Savigny-le-Temple, cote 43 25-1. Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt. 17 septembre 1919. Entre le Sous-Secrétariat aux Finances (liquidation des stocks) représenté par M. Paul Morel d'une part, et MM : Clere & Schwander d'autre part. En manuscrit signé Clere Schwander et P. Morel.

Des munitions intègres ou des fragments de munitions explosives, *Shrapnels* et des bombes de tranchées ont aussi été observées sur le terrain.

Le dépôt de rassemblement de Spincourt fut en partie constitué de projectiles provenant précisément des zones de récupérations renseignées par Clere & Schwander. Des engins chimiques découverts dans les usines de Longwy, Briey et Villerupt furent aussi acheminés à Spincourt pour y être entreposés « *Transmis à M. le Général commandant la 2e Région, avec prière de prendre pour les usines de Villerupt une mesure analogue à celle qui a été prise pour les usines de Longwy-Briey (stockage à Spincourt)*[1098] ». L'Article de *L'Éclair de l'Est*[1099] du 9 septembre 1919 relatait que des projectiles provenaient aussi de la Somme (secteur britannique). Cet Article traduisit par ailleurs toute l'incrédulité et l'incompréhension des populations locales, exposées aux explosions accidentelles, face à ce dépôt de munitions toxiques, volontairement constitué là par l'armée et à leur insu, formé d'engins qui venaient de si loin de chez eux.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer le choix de Spincourt pour y installer ce vaste dépôt de rassemblement.

Premièrement, le canton de Spincourt abritait encore à la fin des hostilités de nombreux et vastes dépôts de munitions ex-allemandes (renfermant à la fin de la guerre une forte proportion d'engins chimiques) desservis par un réseau dense de voies de chemin de fer normales et étroites, laissé par les Allemands et ayant été exploité par toute la logistique nécessaire à la bataille puis au siège de Verdun depuis la plaine de la Woëvre (cf. Figure 159). De grands dépôts ont été identifiés à Muzeray (ferme de Rampont, cf. Figure 159), Vaudoncourt Loison, à Duzey (à proximité de la pièce de marine de 380 mm « Long Max »). Situées dans la zone des Etapes, ces superstructures restèrent intactes, quasiment exemptes de dégâts et directement réutilisables pour l'arrivage et l'expédition de matériels lourds. Ces voies étaient reliées aux réseaux ferrés des zones de récupération, en particulier dans le Pays-Haut (où étaient situés des centres de chargement de munitions chimique de prime importance sur le front de l'ouest (Saulnes et Mont-Saint-Martin)).

Ensuite, une compagnie de Prisonniers de Guerre allemands, propre à fournir aux militaires la main d'œuvre nécessaire aux opérations de déchargement, d'allotissement des engins acheminés par chemin de fer, était stationnée à Spincourt ou y fut spécialement amenée pour ces opérations.

Le Pays-Haut et le bassin minier ferrifère devaient être débarrassés d'urgence des engins abandonnés pour hâter la relance de l'activité industrielle. Les riches terres agricoles des plaines de Champagne et de Picardie de la 2e Région militaire devaient aussi être libérées en priorité des engins de guerre pour les impératifs de la reconstruction agricole. Entre ces territoires, la Meuse, dont la démographie était déjà déclinante avant-guerre, avec un tissu agricole fait de petites exploitations vieillissantes dont les terres étaient de faible valeur vénale. L'installation d'un vaste centre de rassemblement de munitions chimiques sur ce territoire, impliquant la réquisition des terrains, était avantageuse comparativement à d'autres territoires martyrisés par la guerre. L'installation de ce centre en Meuse n'impactaient en rien la relance de l'activité industrielle et agricole.

[1098] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lettre du Ministre de la Reconstitution Industrielle n°4002 ORI/4 du […] mars a/s d'obus à gaz abandonnés par l'ennemi dans les usines de la société anonyme d'Auberive à Villerupt. Transmise par l'Artillerie GQG n°552 IGA du 27 mars.

[1099] Bibliothèque nationale de France. *L'Éclair de l'Est* du 9 septembre 1919.

Très tôt, des opérations d'élimination de certains engins furent engagées et avec elles leur lot d'accidents. Le 17 mai 1919[1100], le premier sinistre significatif se déclara dans le dépôt. Ce jour-là vers 9 heures, une corvée de 13 ouvriers, des PG allemands de la 308e Compagnie, fit éclater des douilles (désolidarisées du projectile) à l'aide d'un canon de campagne ex-allemand de 77 mm à 20 m environ d'un important dépôt d'obus explosifs de tous calibres. Ces opérations permettaient d'éliminer les poudres propulsives et de récupérer le laiton des douilles percutées et ainsi vidées. Vers 9 heures 30, l'un des ouvriers retira du canon une douille qui venait d'être tirée et la jeta à côté des douilles en attente d'être percutées. Cette douille renfermait encore de la poudre en combustion, ce qui mit le feu à d'autres douilles non tirées. Une explosion se déclencha qui enflamma le dépôt à 20 m de là. Les personnels eurent tout juste le temps de se sauver. De 10 heures à 15 heures, le dépôt entier sauta avec de violentes détonations qui se succédèrent en projetant de nombreux éclats métalliques sur Spincourt. Les habitants prirent la fuite en se réfugiant dans la proche campagne. Les routes d'accès à Spincourt furent coupées par le 9e Bataillon de Chasseurs à pied cantonné à Spincourt. Les cheminots réussissent à dégager *in extremis* et à éloigner 36 wagons encore chargés de munitions toxiques et explosives[1101]. Le calme revint vers 17 heures. Aucune victime n'était à déplorer et seuls des dégâts matériels furent relevés, notamment des vitres brisées et des portes transpercées par des éclats d'obus. Le rapport de la gendarmerie qui fut établi précisa que « *cette explosion a pu se circonscrire heureusement dans la périphérie du dépôt explosé, car à 20 m environ au nord se trouve un important dépôt d'obus à gaz* ». Le 18 août 1919, le préfet de la Meuse envoya alors une lettre au Ministre de la Guerre pour l'informer « *des inconvénients que peut présenter l'accumulation indéfinie d'obus toxiques allemands dans le dépôt de Spincourt, et exprime le désir que ce dépôt soit supprimé avant que la main-d'œuvre des prisonniers de guerre ne vienne à disparaître*[1102] ».

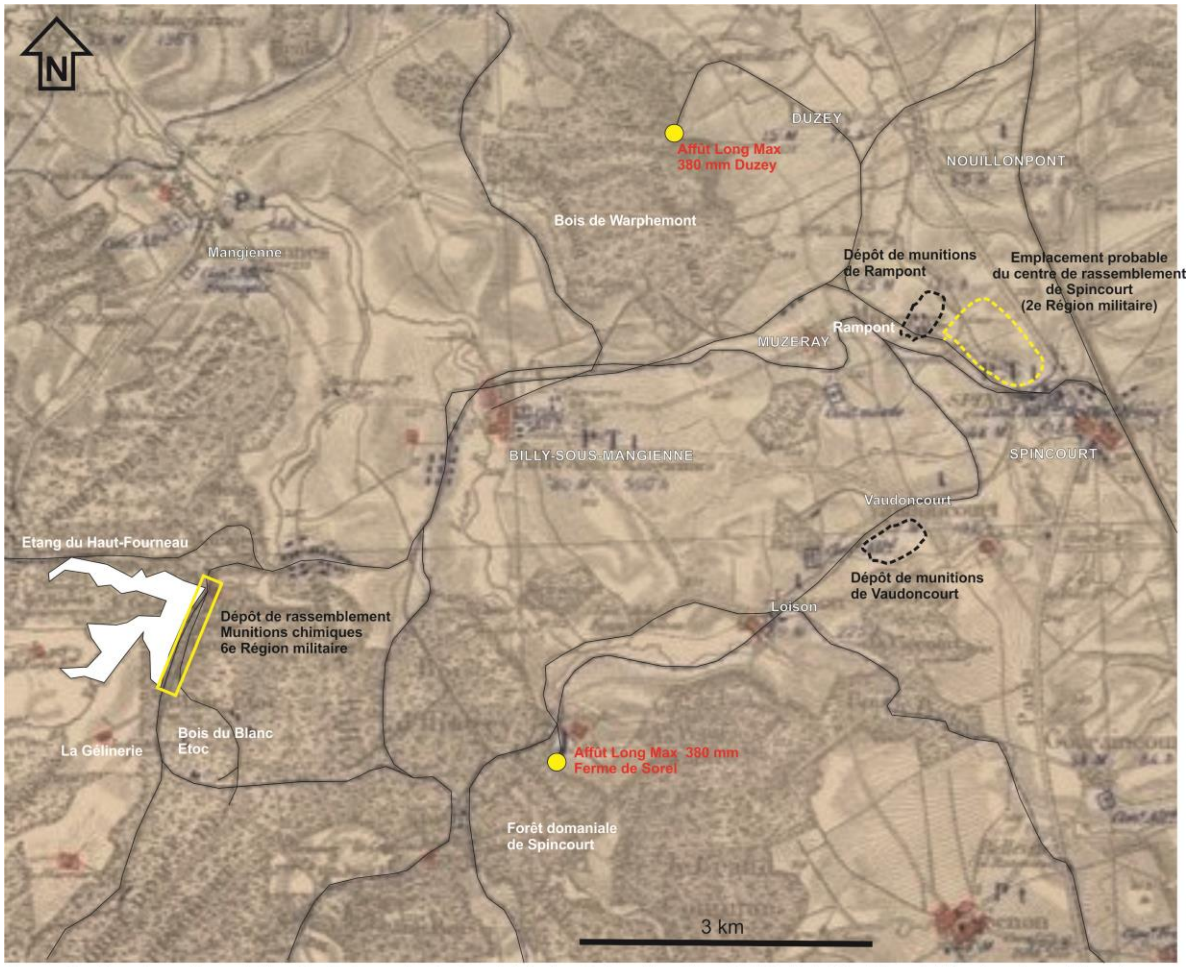
Le Ministre répondit dans son courrier du 28 août 1919 que des instructions avaient été données en vue de faire rechercher un nouvel emplacement pour stocker les obus toxiques allemands de façon à ne pas charger davantage le dépôt de Spincourt. Dans ce même courrier, le Ministère de la Guerre apporta aussi des éléments techniques au préfet de la Meuse, afin qu'il puisse rassurer ses administrés du canton de Spincourt : le dépôt n'était pas en mesure de détoner massivement car les engins chimiques n'étaient armés que de faibles charges explosives. Par ailleurs, à l'exception du phosgène, les toxiques de guerre allemands étaient soit liquides (*Ypérites*, etc.), soit des solides (arsines). Ainsi, les émanations diffuses des obus fuyards résultant « *de défectuosité de fabrication et de l'action des intempéries* » peuvent « *être sensibles à l'odorat ou même provoquer des larmoiements à courte distance, mais elles n'ont pas le pouvoir d'exercer l'action asphyxiante ou vésicante observée sur le champ de bataille*[1103] ».

[1100] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Rapport du lieutenant Mathis de la 2e compagnie de gendarmerie des Ardennes, arrondissement de Montmédy, daté du 20 mai 1919, communiqué au préfet de la Meuse le 23 mai 1919.

[1101] Bibliothèque nationale de France. Le Journal des transports : revue internationale des chemins de fer et de la navigation. 1878-1939, N° 37, 18 octobre 1919.

[1102] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Ministre des Régions Libérées, à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Bar-le-Duc, le 18 août 1919.

[1103] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, Services Chimiques de Guerre. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à M. le Préfet de la Meuse, Bar-le-Duc. Paris, le 28 août 1919. Signé : Maurin.



France. Service géographique de l'armée. Cartographe. Carte spéciale des régions dévastées. 36 NO, Metz [Nord-Ouest] / [Service géographique de l'armée]. 1920.

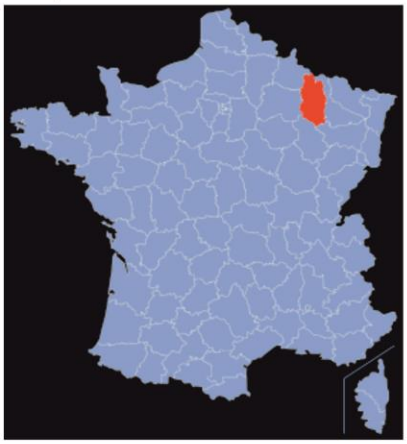


Figure 159 : Localisation des centres de rassemblement des munitions chimiques des 2e et 6e Région militaires en forêt et canton de Spincourt (département de la Meuse)[1104].

[1104] D'après la carte spéciale des régions dévastées 36 NO Metz [nord-ouest]. Service géographique de l'armée. 1920. Bibliothèque nationale de France.

Figure 160 : Orthophoto du dépôt de munitions et de matériel allemand de Rampont / Muzeray en juillet 1918[1105].

[1105] Archives municipales de Muzeray.

La lettre du 18 août 1919 du Préfet de la Meuse au Ministre des Régions Libérées précisait que le nombre d'obus chimiques du dépôt de Spincourt s'élevait à environ 1 000 000 à 1 200 000[1106] et que 400 wagons d'obus toxiques et explosifs étaient encore en attente à Baroncourt, au sud-est de Spincourt. En septembre 1919, le dépôt de Spincourt totalisait déjà le chiffre phénoménal d'un million de projectiles chimiques et 300 000 engins explosifs[1107]. « *La contenance moyenne de 30 wagons étant de 20 000 projectiles, le dépôt de Spincourt après ce dernier arrivage, comprendra environ 1 500 000 obus toxiques*[1108] ». Les wagons chargés de munitions étaient acheminés jusqu'à une gare au nord-ouest de Spincourt (actuel silo de la coopérative agricole).

5.3. RASSEMBLEMENT DES MUNITIONS CHIMIQUES DE LA 6E REGION MILITAIRE

Le rassemblement d'engins de guerre dans la région de Spincourt ne se limita pas au seul canton de Spincourt. Le général Regnier, commandant l'artillerie du 6e Corps d'Armée et de la 6e Région militaire, par un courrier daté du 27 mars 1919, transmit une note au SRMu (Service de Récupération des Munitions) concernant la marche à suivre pour l'organisation du désobusage dans la 6e Région. Elle fixa notamment les modalités de destruction de munitions conformément aux instructions du GQG. Le général ordonna ainsi que les munitions françaises transportables, en bon état de conservation et donc réutilisables, soient regroupées au camp de Chalons (actuel camp de Suippes, dans le département de la Marne) et à Jaulny Déramé (forts du Rozelier et de Jaulny sur l'actuel terrain militaire et champ de tir du Rozelier, au sud-est de Verdun).

Figure 161. Le général Régnier, Commandant la 6e Région militaire.

Par contre, les engins chimiques devaient être rassemblés, réservés à part conformément aux instruction du GQG concernant la récupération pour être expédiés sur un seul site : celui de la ferme de *La Gélinerie*, en bordure ouest de la forêt de Spincourt, sur le territoire de la commune d'Azannes-et-Soumazannes en Meuse[1109].

[1106] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Ministre des Régions Libérées, à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Bar-le-Duc, le 18 août 1919.

[1107] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. 3e Bureau, Services chimiques de Guerre – IIe Section. Objet : dangers d'explosion de projectiles. Bar-le-Duc le 18 septembre 1919.

[1108] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Commandement départemental des PGRL de la Meuse. Note au sujet de dépôt de munitions de Spincourt. Vraisemblablement, le 7 septembre 1919.

[1109] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note pour la destruction des projectiles. Ministère de la Guerre. Paris, le 27 mars 1919.

Les dépôts allemands de munitions « *de toute sorte à l'exception de celles en bon état et des cartouches d'infanterie réservées pour l'Armée polonaise* » renseignés dans la 6e Région militaire par le général Lequine, commandant l'Artillerie du VIe Corps d'Armée en date du 21 février 1920 dans le cadre d'une consultation d'entreprises de démolition de munitions (F.N. Pickett & Fils, Clere & Schwander, Bouxin et la Société Minerais et Métaux) étaient ceux de Vieux-les-Asfeld (746 tonnes), Blanzy (629 tonnes), Anthes (450 tonnes), autres dépôts Buzancy (500 tonnes), Saint-Maul (800 tonnes), et 4 300 tonnes d'obus et de *Minen* chimiques allemandes du camp de Chalons.

Une note datée du 5 mai 1920 fait état de la présence à la ferme de la Gélinerie de 28 000 obus toxiques[1110]. Le dépôt de munitions principal était situé entre des voies ferrées (voies étroites de 0,6 m) à l'est de l'actuelle ferme de la Gélinerie, contre l'étang du Haut-Fourneau. Ce dépôt de 200 m de long, organisé en 9 îlots, aurait totalisé entre 300 000 et 400 000 munitions.

Les Articles de presse (*Le Bulletin Meusien*) et les courriers de l'administration des Eaux & Forêts indiquent que des munitions chimiques constituèrent tout ou partie ce dépôt ; ainsi, le courrier du 16 juillet 1920 du conservateur des Eaux & Forêts[1111] à la Direction générale des Eaux & Forêts exposa, à propos d'un agent du service forestier : « *Guillemin déclare que le 22 juillet, vers 9 h et demie [...] il a ressenti l'effet des gaz toxiques provenant d'obus fuyards de l'ancien dépôt allemand* ».

Le 27 juillet 1920, le capitaine Thomas, chef du service des munitions sollicita l'avis du conservateur des Eaux & Forêts concernant l'établissement d'« *un dépôt provisoire d'obus toxique dans le Bois du Blanc Étoc, aux environs de la ferme de "La Gélinerie", canton de Damville* »[1112], une demande auquel le conservateur ne s'opposa pas. Un stock de munitions toxiques initialement positionné à la ferme de la Gélinerie aurait donc été transféré en 1920 dans le Bois du Blanc d'Étoc, en pleine forêt de Spincourt (cf. Figure 159). Il n'est fait dans les archives aucune mention des motifs de cette réorganisation du dépôt de munitions.

5.4. RESUME ET CONCLUSIONS

Ainsi, contrairement aux instructions du GQG de 1918, le centre de rassemblement de Spincourt ne fut pas positionné à l'écart des habitations. La ferme de Rampont à Muzeray était située à 500 m environ du dépôt ex-allemand, et le bourg de Spincourt à 700 m environ de l'emplacement vraisemblable du centre de rassemblement. En ce qui concerne le dépôt de l'étang du Haut-Fourneau, son isolement en environnement forestier fut certainement un des critères motivant le choix de cet emplacement.

L'existence (i) d'un réseau dense de voies ferrées normales et étroites installés par les Allemands durant la guerre pour alimenter depuis de vastes dépôts les batteries d'artillerie ayant pilonné le champ de bataille de Verdun, de surcroît en bon état et à l'écart des zones de destruction de la « zone rouge », connecté à des secteurs de récupération et (ii) la présence de grands dépôts de matériels et munitions ex-allemands dans le canton de Spincourt, constituent les principaux arguments ayant motivé l'installation à Spincourt de ce vaste dépôt de rassemblement. L'accumulation de tous ces projectiles dans un secteur géographique restreint de quelques 50 km^2, entre Spincourt et Gremilly résulte aussi de la position de ce secteur, à cheval entre les 2e et 6e Régions militaires, et de la faible valeur agraire des terres (comparativement à celles de Champagne et de Picardie).

[1110] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère des Régions Libérées. Département de la Meuse. Direction générale des services techniques de reconstitution. Note n° 2570 à Monsieur le Préfet de la Meuse. Bar-le-Duc, le 5 mai 1920.

[1111] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1184 W 696. Courrier du 16 juillet 1920 du conservateur des Eaux & Forêts à la Direction générale des Eaux & Forêts.

[1112] Ibid.

Il est vraisemblable que le dépôt de Spincourt ait renfermé des engins d'une grande diversité d'origine (française, allemande, britannique), de calibre et d'état, entre ceux non tirés des dépôts ex-allemands du secteur de Spincourt et du bassin minier, et ceux, provenant éventuellement de récupérations sur et aux abords sur les anciens champs de bataille. Des opérations de destruction de munitions furent rapidement engagées par l'autorité militaire, avec le recours d'une main d'œuvre de prisonniers de guerre alors que le Ministère de la Guerre était déjà en discussion avec des entreprises civiles privées pour faire réaliser la liquidation de ce vaste stock via une adjudication.

Aucun autre dépôt de rassemblement de munitions chimiques de l'importance de celui de Spincourt n'a été identifié sur ou à proximité des territoires concernés par le front occidental au regard des archives consultées dans le cadre de cette recherche.

Ces exemples illustrent parfaitement les conséquences du rassemblement par les autorités militaires des différentes régions concernées, des munitions récupérées éparses ou initialement entreposées dans de petits dépôts dispersés. Ces opérations conduisirent à la formation de très vastes dépôts, formés d'un matériel souvent hétérogène, au sein desquels, le moindre accident pouvait se transformer en catastrophe, mettant en péril les habitations proches voisines et leurs occupants qui subissaient une situation qui leur avait été imposée d'office. Les explosions accidentelles qui se succédèrent en 1919, mettant en péril le village de Spincourt et le risque de voir disparaître la main d'œuvre des PG agirent comme des leviers pour hâter les destructions déjà engagées par l'autorité militaire par pétardement, à l'insu des populations.

6. Méthodes et moyens de gestion des REG et des risques. Approches préventives et curatives

6.1. INFORMER, PREVENIR. « *NE TOUCHEZ PAS AUX MUNITIONS*[1113] »

L'une des premières missions des Services de la récupération et du désobusage était de garantir la sécurité des populations civiles qui eurent à évoluer dans un environnement dans lequel furent introduits puis délaissés des engins de guerre encore en puissance d'explosion. La solution la plus radicale pour sécuriser ces populations était la récupération et l'enlèvement de ces engins pour être entreposés dans des dépôts dédiés et sécurisés, être détruits ou encore être définitivement abandonnés par leur immersion ou leur enfouissement dans des conditions telles que plus personne ne pouvait y avoir accès.

Mais les autorités militaires avaient déjà pressenti durant le temps des hostilités que, face à l'ampleur de la tâche, au regard notamment du manque de main d'œuvre mise à disposition, l'enlèvement des REG constellant l'ancien front et ses abords serait lente et les résultats tangibles sur le terrain, longs à obtenir. La parade à cette situation, dans le but de protéger les populations civiles, fut préventive. Le Ministère de la Guerre avait appelé dès septembre 1914 la population civile en général, et en particulier les agriculteurs ayant à reprendre les labours, à la plus grande prudence face à la présence sur et dans les sols des engins de guerre. Avec le retour progressif des militaires dans leurs garnisons, les civils se réappropriant leurs terres se retrouvèrent seuls face à des quantités considérables de matériels de guerre affleurant à même le sol, cachés dans les ruines, les granges. D'autres surgirent du sol à la faveur de la reprise des labours. Cette population n'était pas sachante en matière de munitions et méconnaissaient leur fonctionnement et les risques qu'elles portaient. Ces objets insolites attisaient la curiosité et attiraient les enfants.

[1113] Bélot, H. *En Attendant les démineurs.* https://www.deminest.fr/

Le lancement de nouvelles campagnes de sensibilisation aux risques inhérents aux engins de guerre abandonnés furent lancées, en France comme en Belgique, notamment par voie d'affichage publique. Elles furent initiées et organisées par les instances civiles et militaires (comme par exemple le Cabinet Civil du Ministre de la Guerre en France) « *J'ai l'honneur de vous demander de vouloir bien donner des instructions pour que soient multipliées les affiches mettant en garde nos compatriotes des régions libérées, contre les dangers qu'il peuvent courir* »[1114].

Des affiches visant spécifiquement la population la plus jeune furent aussi produites et placardées dans les rues des communes concernées. D'autres appelèrent à la prudence en déconseillant l'allumage de feux (conséquence d'accidents provoqués par cette entremise). En Alsace, cette campagne de sensibilisation se fit en français et en allemand (cf. Figure 162), en Belgique, en français et en flamand (cf. Figure 163), afin de toucher toutes les sensibilités compte tenu des particularités linguistiques de ces provinces. Il s'agit d'une solution préventive de première urgence, pragmatique, nécessaire mais insuffisante pour régler la question des risques inhérents aux engins de guerre.

6.2. PRIORISATION DES ACTIONS DANS L'APPROCHE CURATIVE DU DESOBUSAGE

Un ordre « *logique* » des opérations de récupération fut définit qui devait pleinement répondre aux objectifs même de la récupération, à savoir libérer le plus rapidement possible les terrains des matériels de guerre les plus dangereux qui entravaient la libre reconstruction urbaine, industrielle et agricole tout en cherchant à récupérer et regrouper toutes les matières et matériels valorisables et propriété d'Etat. La sécurisation des reconstructions agricoles et industrielles était la mission prioritaire de la récupération militaire.

L'ordre retenu était le suivant : *(i) « Débarrasser le terrain des munitions et engins dangereux ou suspects qui empêchent tous autres travaux de s'effectuer en sécurité relative ».* Le nettoyage du terrain était en effet une opération préliminaire prioritaire car préliminaire à toutes les autres *« Les opérations de récupération pourront, dans une même commune se poursuivre simultanément avec les travaux de reconstitution, à condition que chaque parcelle de terrain, la récupération soit terminée avant le travail de reconstitution » […] « (ii) Débarrasser le terrain de tous matériels empêchant la remise en culture du sol ou la reconstitution des usines (iii) Regrouper l'ensemble des matériels qui constituent un capital énorme pour l'Etat, (iiii) Mettre en ordre et tenir sur place, à la disposition des services qui peuvent avoir l'emploi, les matériaux susceptibles de servir à la reconstitution du territoire, (iiiii) Faire exécuter les travaux de remise en état des terrains et villages suivant les instructions du Service de la Reconstitution des Régions Libérées [1115]».*

Les opérations de récupération et de désobusage, identifiées comme impératives et nécessaires mais reléguées au second plan des actions militaires par le GQG durant les combats de 1918 furent donc précipitées au premier plan des préoccupations militaires comme civiles une fois les derniers coups de feu échangés et le terrain national réoccupé. Redresser les régions dévastées c'était d'abord les sécuriser et les débarrasser des restes de guerre.

L'exécution des opérations fit l'objet de rapports spéciaux et de compte-rendu uniques dans lesquels étaient identifiées les quantités de douilles évacuées, les munitions d'infanterie et d'artillerie, les caisses à munitions, les armes portatives et matériels divers récupérés, classés selon leur nature.

[1114] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du 3 mars 1919 du Cabinet Civil du Ministre de la Guerre, à l'attention de M. le Maréchal de France Commandant en chef.

[1115] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919.

Touristes, Attention !

Malgré toute l'attention des autorités et des services chargés du nettoyage des anciens champs de bataille il y aura, pendant longtemps encore, des ENGINS DE MORT „OBUS, GRENADES, TORPILLES, DÉTONATEURS, FUSÉES D'OBUS, etc." enfouis ou non et susceptibles d'éclater au moindre choc ou s'ils sont à proximité d'un foyer.

Donc :

Ne touchez pas aux engins trouvés.

Mais, dans l'intérêt général, laissez à proximité une marque apparente et si possible une indication écrite.

Signalez-les dans les Mairies.

Si vous faites du feu, prenez garde. Des grenades, détonateurs et obus sont parfois enterrés à fleur de sol.

Attention aux éboulements dans les tranchées et les abris.

STRASBOURG, le 15 Avril 1921.

ACHTUNG ! TOURISTEN !

Todesgefahr !

Trotz der behördlichen Massnahmen und der fortschreitenden Aufräumungsarbeiten im ehemaligen Kampfgebiet werden sich daselbst während längerer Zeit noch Geschosse, Granaten, Mienen, Schlagröhren, Geschosszünder, usw. eingegraben oder offen umherliegend vorfinden, welche bei der geringsten Erschütterung oder in der Nähe einer Feuerstelle explodieren können.

Daher :

Berührt keine aufgefundenen Geschosse !

Stellet vielmehr im allgemeinen Interesse in der Nähe des Fundortes ein besonderes Zeichen auf, wenn möglich eine kurze Notiz.

Erstattet dem nächsten Bürgermeisteramt über den Fundort Anzeige.

Vorsicht beim Anzünden eines Feuers.

Granaten, Schlagröhren und Geschosse liegen vielfach nur mit einer dünnen Erdschicht verdeckt.

Achtung auf die Einsturzgefahr in den Schützengräben und den Unterständen.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL DE LA RÉPUBLIQUE.

Figure 162 : Affiche bilingue pour la prévention des risques liés aux engins de guerre ancien abandonnés sur les lieux de tourisme mémoriel en Haute-Alsace. Commissariat Général de la République, Strasbourg, le 15 avril 1921[1116]*.*

Figure 163 : Civils contemplant une affiche pour la prévention contre les dangers des engins de mort. Les enfants, victimes privilégiées de engins non explosés, sont clairement visés par cette affiche. « Enfants ! ne touchez pas aux engins de guerre. C'est la Mort qui vous tend un piège » Vansassenbroeck, Belgique. 25 mars 1919.[1117]*.*

[1116] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Affiche bilingue pour la prévention des risques liés aux engins de guerre ancien abandonnés sur les lieux de tourisme mémoriel en Haute-Alsace. Commissariat Général de la République, Strasbourg, le 15 avril 1921.

[1117] Imperial War Museum, number Q 7486A. Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer).

6.3. PRISE EN CHARGE DES REG ET PRIORISATION DES DESTRUCTIONS

« Fait d'abord le nécessaire, ensuite ce qui est possible et seulement après tu feras l'impossible[1118] *»*

6.3.1 Triage et ventilation des matériels transportables

Les matériels (transportables) issus de la récupération étaient ventilés dans deux grands types de dépôts (i) les dépôts de rassemblement établis au plus près d'une part de la zone de travail (secteur de récupération) et au voisinage si possible de voies de communication à haut rendement (lignes de voies ferrées normales, canaux, etc.) (ii) les dépôts de triage où le matériels fut amené en grandes quantités puis répartis en stocks intéressant chaque services (de l'Artillerie,) et dans chaque stock triés en trois catégories (i) le matériel utilisable en l'état, (ii) le matériel utilisable après réparation, (iii) le matériel définitivement inutilisable. Le triage exigeait des compétences techniques pointues en matière de munitions et de matériels pyrotechniques.

Les engins identifiés sur le terrain et jugés intransportables ou « douteux » étaient détruits sur place ou au plus près de leur lieu de découverte par les artificiers. Détruire les engins intransportables constitua en soit une tâche énorme. Par où commencer ? Parer à l'urgence ?

6.3.2 Priorisation des destructions de munitions

Récupérateurs et artificiers, qu'ils soient civils ou militaires, eurent, face à l'ampleur de la tâche à accomplir, d'abord à discriminer ce qui relevait de l'urgence et du nécessaire de ce qui était facultatif et susceptible d'être reporté.

Des programmes de travail furent établis sur presque toute la superficie de l'ancienne zone de combat à la diligence du commandant de l'Artillerie de chacune des Régions militaires concernées. Les programmes opérationnels établis par l'Artillerie étaient basés sur un ordre d'urgence tenant compte de considérations techniques générales (nature, état des munitions notamment) et de spécificités locales. Trois niveaux d'urgence « *normale* » furent identifiés par la Direction de l'Artillerie pour neutraliser et éliminer les engins de guerre dangereux découverts sur les anciens champs de bataille. Ils sont décrits dans l'Annexe 2 des instructions du 7 juillet 1919.

La première urgence visait « *tout ce qui traîne* », pouvant provoquer ou propager un incendie ou provoquer une explosion accidentelle, qu'il s'agissait de munitions ou d'artifices en dépôts ou épars : munitions pillées ou en désordre, poudres et explosifs répandus, grenades hors emballage ou dont l'emballage était détérioré, douilles et gargousses chargées de poudres et séparées du projectile, détonateurs, pétards et artifices en tout genre et en vrac. Les artilleurs cherchèrent aussi à éliminer les munitions en cours de détérioration et les munitions instables, les signaux éclairants et les fûts d'explosifs chlorates (*Cheddites*) qui séjournèrent trop longtemps sans abris, ainsi exposés aux rayons du soleil. Non seulement la *Cheddite* n'était plus utilisable mais elle devint particulièrement dangereuse. Ces fûts étaient détruits sur place en limitant au maximum les manipulations.

En seconde urgence, étaient visés les engins chargés en explosifs nitratés, lorsque les munitions étaient visiblement défectueuses ou pour lesquels cet explosif n'était pas à l'abri de l'humidité, et les engins chargés en explosifs (per)chloratés exposés à de nombreux cycles répétés de chaleur et de froid.

[1118] Saint François d'Assise (1182-1226).

En effet avec la chaleur puis le froid, les *Cheddites* (chloratées) et *Percheddites* (perchloratées) devinrent instables les munitions chargées par ces explosifs devinrent donc inutilisables et leur transport délicat. Etaient également concernés les pétards de destruction, les grenades de tout modèle et les artifices de mise à feu, les pétards nitratés (à base de *Donarite*, de *Westfalite*) ou perchloratés allemands (à base de *Perdite*). Des instructions furent aussi passées aux artificiers pour utiliser ces charges explosives puissantes et brisantes pour initier la détonation des fourneaux de destruction (pétardement, cf. § 6.4). Enfin, à cet ordre d'urgence, furent rattachées les destructions dans les dépôts de toutes les grenades allemandes et des grenades françaises déclassées ou règlementaires si elles étaient amorcées.

En troisième urgence, se rangeaient les destructions faites en vue d'élimination des dépôts et surplus de munitions ; il s'agissait de détruire d'abord les obus français dont le marquage distinctif n'était plus visible, les munitions de tout type et en mauvais état de conservation, parmi lesquelles les grenades françaises de tous modèles et les projectiles français d'artillerie de tranchées. Enfin, étaient à éliminer les munitions allemandes en commençant par les projectiles d'artillerie de tranchées et en terminant par les dépôts de munitions d'artillerie de campagne et d'artillerie lourde qui n'avaient pas fait l'objet d'une réserve particulière explicite. Cette réserve consistait à écarter des destructions et à mettre en dépôt, d'une part, les coups complets en bon état, encore potentiellement utilisables après cession aux troupes alliées et, d'autre part, les munitions toxiques qui devaient être stockées à part.

On constate donc un changement de position du GQG eu égard au devenir des munitions ex-allemandes, entre les instructions de décembre 1918 / janvier 1919 et celles de juillet 1919. Ces munitions n'étaient plus systématiquement visées en 1919 par des destructions, mais devaient être pour partie réservées. Entre ces deux dates, le Traité de Versailles fut signé. Il est probable que les injonctions de récupération prioritaire des projectiles français en bon état ordonnée en 1918, assorties de celle visant le rassemblement et de la destruction du matériel ex-allemand, furent motivées par la volonté du GQG de maintenir sa puissance de feu face à une Allemagne considérée comme toujours menaçante, tout en détruisant l'arsenal qu'elle laissa en France, pour supprimer toute possibilité qu'elle puisse un jour le récupérer et le retourner contre la France. Une fois le Traité signé, les destructions en urgence des matériels ex-allemands ne se justifièrent plus.

En résumé, le GQG identifia comme étant prioritaire, la démolition des matériels les plus instables, de conservation douteuse, notamment ceux constitués ou chargés d'explosifs (per)chloratés et les munitions ex-allemandes dont l'armée française ne savait que faire.

6.4. COMMENT ELIMINER LES MUNITIONS ?

> « *En raison des difficultés de conservation et des dangers que pouvaient présenter certaines stocks de poudres, explosifs, artifices ou munitions, des ordres ont été donnés pour l'incinération, la destruction ou le noyage de quantités plus au moins importantes de munitions diverses* »[1119].

L'élimination de munitions de guerre s'effectua dans un premier temps et aux premières heures du désobusage en procédant comme durant la guerre par la destruction par éclatement (pétardement) ou en faisant fonctionner les engins mais dans des conditions sécurisées et contrôlées.

6.4.1 Destruction des grenades

Les grenades en bon état étaient pragmatiquement neutralisées en les faisant fonctionner (en les dégoupillant). Un film d'archive conservé à l'ECPAD (Établissement de Communication et de Production Audiovisuelle de la Défense) montre ces opérations [1120] (cf. Figure 164) par ailleurs mentionnée par Dorgelès dans *Le Réveil des Morts*: des soldats français dégoupillaient les grenades et les précipitèrent dans des cratères emplis d'eau ce qui atténuait le souffle de la détonation et la propagation des éclats.

Les grenades, lorsqu'elles avaient été tirées furent détruites sur place par pétardement car indéplaçables. Celles non armées pouvaient être transportées vers des centres de destruction où elles furent pétardées en fourneaux.

Figure 164 : Eclatement volontaire de grenades dans une dépression remplie d'eau (capture d'écran)[1121].

[1119] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du 28 mars 1919 du Sous-Secrétaire d'Etat de l'administration générale à M.M. les Commandants des Parcs et les Directeurs des Etablissements de l'Artillerie. Signé illisible.

[1120] ECPAD, référence VTS_01_3 14.18 A 586.

[1121] ECPAD, référence VTS_01_3 14.18 A 586.

6.4.2 Pétardement des munitions en fourneaux (*Open Detonation*)

Pendant et après la Grande Guerre, l'éclatement (ou pétardement ou *Open Detonation* (OD) chez les anglo-saxon), c'est-à-dire la destruction des munitions explosives par la transmission par sympathie d'une détonation initiale volontairement provoquée, fut essentiellement pratiqué sur des engins épars non transportables et découverts sur les anciens champs de bataille. Le pétardement fut par ailleurs aussi réalisé après un court transport et leur rassemblement dans des dépôts. Mais les quantités d'engins, suite à leur abandon à la fin des hostilités, furent telles que ces manières de procéder ne surent suffire aux besoins imposés par l'urgence et la nécessité de les éliminer. Des méthodes de démolition en masse devaient être imaginées puis développées par les personnels compétents, c'est-à-dire ceux, militaires, de l'Artillerie, du Génie, de l'Ecole Centrale de Pyrotechnie, aidés par des personnels civils, artificiers ou experts du service des poudres et explosifs.

Expérimentation des pétardements de masse par détonation par « sympathie »

Trois documents cinématographiques exceptionnels conservés au Centre National Cinématographique (CNC), produits par la Direction des Inventions des Etudes et des Expériences Techniques montrent (en 1918, mais non daté) des séquences saisissantes d'opérations de pétardement de masses, avec des fourneaux totalisant plusieurs dizaines voire centaines de tonnes de projectiles et/ou d'explosifs en barriques.

Elles furent opérées à proximité du village détruit de Tahure, classé en *zone rouge*, au sein d'une emprise du camp de Chalons qui deviendra le camp militaire de Suippes (actuel Cential, Centre d'ENTraînement InterArmes et du soutien Logistique de l'Armée française) à l'est de Reims. Il s'agit vraisemblablement du centre de destruction de Ripont dans la partie est de l'actuel camp militaire.

Le premier film (intitulé *Déminage à Tahure : première explosion* [1122]) (cf. Figure 165) capte la première explosion ; des officiers examinent au préalable, en présence de hauts gradés, du Maréchal Joffre[1123], les munitions soigneusement empilées en fourneaux d'éclatement en plein champ. L'explosion d'une incroyable violence ouvrit un vaste entonnoir et éparpilla de nombreux projectiles intacts ou endommagés par la détonation.

Le second film (intitulé *Déminage à Tahure : seconde explosion*[1124]) montre un essai de « *self excitation* », c'est-à-dire une tentative de transmission de la détonation d'une charge vers une autre (pour induire sa détonation « par sympathie »). Ces charges étaient ici constituées de tonneaux d'explosifs (per)chloratés. La puissance de la détonation ouvrit elle aussi une large dépression (cratère) mettant à nu la nappe phréatique et projeta aussi des tonneaux d'explosifs qui, éventrés, libérèrent les explosifs dans les sols bouleversés où ils achevèrent de se consumer. Il s'agit possiblement de l'emplacement de l'actuelle source de la rivière Dormoise.

Enfin le troisième film (intitulé, *Déminage à Tahure : troisième explosion*[1125]) (cf. Figure 166) présente des séquences particulièrement impressionnantes. Il montre la préparation de fourneaux de pétardement formés de plusieurs centaines d'obus d'artillerie de gros calibre, séparés par des merlons en terre soigneusement préparés et reliés par des cordons détonants.

[1122] CNRS Images. Déminage à Tahure : première explosion. Direction des Inventions, des Etudes et des Expériences Techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/4265.

[1123] *Ibid.* Présence de Joffre selon les commentaires associés à la présentation du film.

[1124] CNRS Images. Déminage à Tahure : deuxième explosion. Direction des Inventions, des Etudes et des Expériences Techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/6709.

[1125] CNRS Images. Déminage à Tahure : troisième explosion. Direction des Inventions, des Etudes et des Expériences Techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/6711.

D'autres fourneaux étaient constitués de barriques renfermant des explosifs (dont du M.M.N., *Mélinite* + MonoNitronaphtalène). La seconde partie du film comprend un ensemble de séquences montrant les résultats du pétardement de masse : de grandes quantités d'obus ne détonèrent pas mais furent éjectées (certains probablement endommagés, fracturés) par le souffle de l'explosion sur des centaines de mètres à la ronde, constellant la surface du sol de l'ancien champ de bataille sous le regard d'officiers.

Ces films mettent parfaitement en exergue un phénomène connu des artificiers, celui de la détonation par sympathie partielle des fourneaux massifs et la projection autour du point de détonation (au sein d'un périmètre de plusieurs centaines de mètres de diamètre) de munitions intactes ou endommagées, voire fracturées.

Il s'agit ici de toute évidence d'expérimentations de destructions en masse des engins de guerre du conflit venant de s'achever conduites par l'Armée. La monstration de l'éradication des restes de guerre, et en creux de la guerre elle-même, par une prise en main ferme, radicale et rassurante par l'autorité militaire selon des procédés techniquement maîtrisés et efficaces, n'était-elle pas aussi l'intention de ces films destinés à être diffusé ? Une inauguration par les officiels des opérations de destructions massives pour éliminer les restes et épaves de guerre, en libérer les territoires pour en finir avec la guerre ?

Figure 165 : Détonation du tas de munitions à Tahure (Somme-Py, département de la Marne)[1126]. Capture d'écran.

[1126] CNRS Images. Déminage à Tahure : première explosion. Direction des Inventions, des études et des expériences techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/4265.

Figure 166 : Préparation de fourneaux d'éclatement à Tahure (Somme-Py, département de la Marne)[1127]. Munitions non détonées dispersées après avoir été projetée par l'explosion des fourneaux (en bas) Capture d'écran.

[1127] CNRS Images. Déminage à Tahure : troisième explosion. Direction des Inventions, des Etudes et des Expériences Techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/6711.

Modus operandi des destructions d'engins explosifs par pétardement

La note du GQG n° 3.071 / GDE du 7 décembre 1918 « *sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille*[1128] » précise les méthodes et modes opératoires à suivre par les personnels de l'Armée française pour détruire les munitions.

- **Choix des emplacements**

Des centres d'éclatement furent créés, dont le choix des emplacements, l'aménagement, ainsi que l'exploitation incombaient dans un premier temps aux services de l'Artillerie. Ces centres d'éclatement se limitèrent à quelques cratères (entonnoirs d'éclatement) pour de petits tonnages à détruire, mais certains d'entre eux, comme ceux de Fampoux (département du Pas-de-Calais) et de Loison (département de la Meuse), pouvaient prendre des dimensions considérables par l'agrégation de dizaines de gros entonnoirs d'éclatement de 5 à 7 m de profondeur pour des diamètres excédant 10 à 15 m.

Les artificiers recherchaient des emplacements privilégiés pour opérer les démolitions afin de limiter les nuisances sonores, écarter les populations civiles et les risques de projection d'éclats et de matériaux issus du sol. « *La destruction des projectiles non tirés s'effectuera en disposant en tas, de préférence dans une tranchée, carrière ou derrière un talus, un certain nombre d'obus*[1129] ». Des instructions furent passées aux artificiers par les Directions de l'Artillerie afin de privilégier les cratères d'impact déjà existants car les dégâts occasionnés par les destructions endossèrent le statut de « dommage de guerre », (« *les dépenses de ce chef seront imputées aux dommages de guerre*[1130] ») alors que l'éclatement en pleine terre, causant des dégâts aux terrains, donnait droit pour les propriétaires fonciers, conformément à l'Article 60 de la Loi du 17 avril 1919, à un dédommagement financier (« *les dommages sont alors imputables au Service de l'Artillerie* [1131] »). Ce dernier cas de figure faisait généralement suite à des destructions opérées en plein champ sur des munitions intransportables. Enfin, ces pétardements étaient réalisés non loin des lieux de découverte des munitions à éliminer. Parfois même, comme en Belgique, ces destructions étaient opérées dans les anciens abris bétonnés construits par les Allemands, les détonations permirent ainsi de liquider les anciennes munitions et les structures bétonnées qui encombraient les champs destinés à être remis en culture.

- **Destructions par éclatement (*Open Detonation*) en fourneaux**

Les munitions à détruire étaient disposées par les artificiers (cf. Figure 169) en tas ou « fourneaux » au fond des entonnoirs puis, ils y apposaient une charge explosive (pétard) dont ils actionnaient la détonation, en toute sécurité une fois à distance. Dans le Soissonnais, les artificiers avaient coutume de charger « *20 obus par fourneaux pour les gros calibres 210*[1132] ».

Les détonations des fourneaux étaient amorcées « *soit au moyen de pétards de Cheddite, soit, de préférence, en provoquant l'explosion d'un projectile, au moyen de deux amorces Mle 1880, placées dans la gaine et maintenues au moyen d'un bourrage en papier ; l'une de ces amorces est munie d'un morceau de mèche lente de longueur convenable*[1133] ».

[1128] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG n° 3.071 / GDE du 7 décembre 1918 sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille.

[1129] *Ibid.*

[1130] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministre de la Guerre. 2e et 3e Régions. Service de l'artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport particulier fait par M. Gras, contrôleur de 2e classe du 5 mai 1921.

[1131] *Ibid.*

[1132] Bibliothèque nationale de France. Lectures pour tous, *op. cit.*

[1133] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. La note du GQG n° 3.071 / GDE du 7 décembre 1918 sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille.

Le projectile qui initiait la détonation du tas « par sympathie » était placé de préférence au-dessus de la pile pour éviter la projection de projectiles en cas de détonation incomplète. L'initiation de la détonation était parfois aidée par des pétards comme ceux à base de *Mélinite*.

Les artificiers confectionnaient les fourneaux (cf. Figure 167) en plaçant en général les munitions de plus gros calibre à leurs bases, surmontées d'engins de calibres moindres ou d'explosifs (per)chloratés particulièrement puissants. Lorsque plusieurs fourneaux étaient exploités en parallèle, les différents cordons étaient coupés et réglés de sorte que les explosions soient séparées de 45 secondes environ. Les opérations pouvaient ainsi être surveillées de loin, depuis un abri constitué de sacs de sable et de traverses de chemin de fer, disposés selon un agencement suffisamment résistant pour parer au souffle des explosions. Le décalage de la mise à feu des fourneaux permettait aux artificiers de s'assurer, en comptant le nombre de détonations, que chaque fourneau avait bien fonctionné. Ces démolitions étaient souvent réalisées à heures régulières (entre 12h00 et 13h00 par exemple) après information de la population locale pour que cette dernière puisse s'organiser en connaissance de cause et ne pas être surprise par les détonations et leurs effets.

Cette opération était répétée autant de fois que nécessaire et jusqu'à ce que les entonnoirs devinrent inutilisables, parce que trop profonds, et/ou qu'ils se remplirent d'eau. Alors, les artificiers se placèrent à côté des entonnoirs et ils réitérèrent l'opération. Ces destructions répétées, s'enchaînant à la suite des unes des autres, ou menées en parallèle dans plusieurs entonnoirs furent à l'origine de la création de chapelets d'entonnoirs profonds, parfois organisés en plusieurs rangées dans des « terrains d'explosion » dont la profondeur et l'extension (nombre et taille des entonnoirs) étaient directement proportionnelles aux tonnages détruits. Trois exemples de champ d'explosion sont présentés dans ce qui suit : (i) les deux terrains d'explosion de Confrémeaux (cf. Figure 168), (ii) le vaste champ d'éclatement de Noire Fontaine à Vaudoncourt (cf. Figure 170) et (iii) les terrains d'éclatement associé aux anciens dépôts ex-allemands à proximité des anciens ateliers de chargement avancés de munitions chimiques de Mancieulles-les-Briey (Figure 171).

Des tonnages élevés de munitions furent détruites à Confrémeaux pendant la guerre ou dans la sortie de guerre à en croire les dimensions des deux grands terrains d'explosion identifiés sur photographie aérienne anciennes (1936, 1937, 1951). Les profonds entonnoirs d'éclatement possèdent des diamètres de l'ordre de la dizaine de mètres. Le terrain d'explosion n°2 occupe une superficie d'environ 120 x 120 m (soit 1,4 hectares).

Un descriptif détaillé de la structure des entonnoirs d'éclatement et de l'organisation des différents types de terrains d'explosion fait l'objet de la Section 2e du présent manuscrit.

Figure 167 : Préparation de fourneaux d'éclatement par des artificier civils (non daté, vers 1919) (a). Une amorce reliée à une mèche lente ; on détonant est placée à l'œil ogival des obus désamorcés à détruire (b)[1134].

[1134] ECPAD, référence VTS_01_1 14.18 A 1259, capture d'écran.

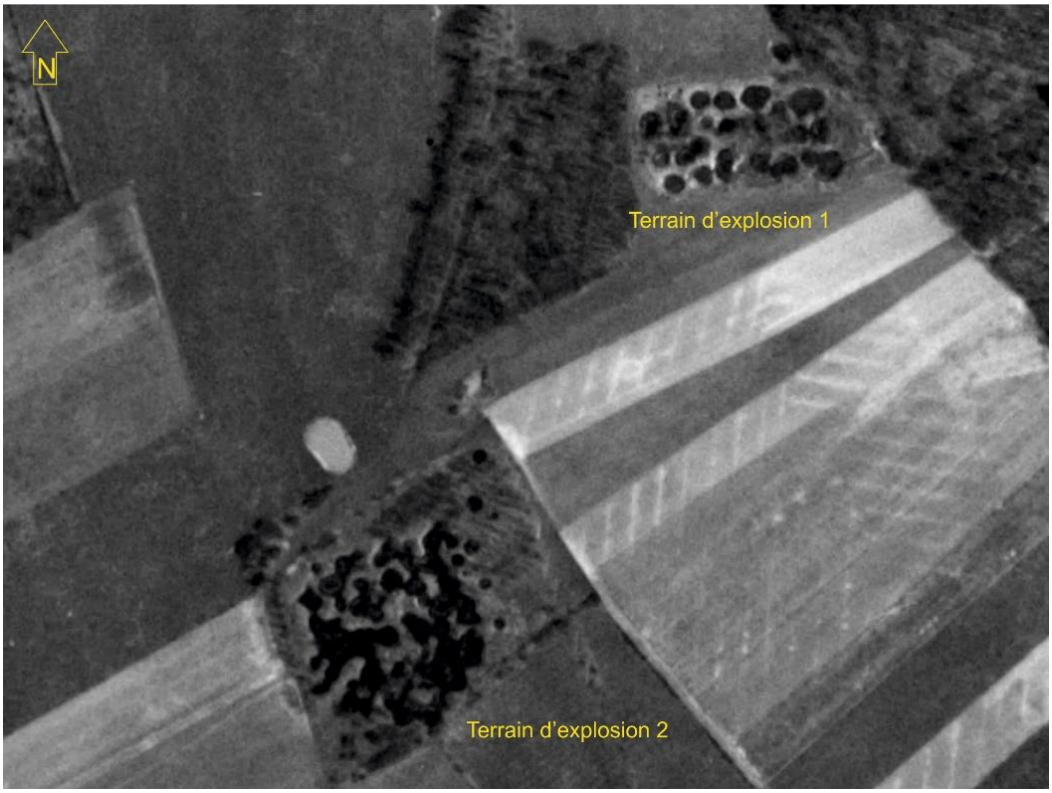


Figure 168 :Les deux terrains d'explosion de Confrémeaux (département de l'Aisne)[1135].

Figure 169 : Equipe d'artificiers français soldats du 33e d'Arras en mission de désobusage posant devant un empilement d'obus allemands en mai 1919 à Frais-Marais, au nord de Douai (département du Nord). A noter le soldat en bas à droite portant l'uniforme (Italiens ?). Cinq d'entre eux arborent une fourragère[1136].

[1135] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1951-04__C2613-0041_1951_F2613-2713_0137. Extrait.

[1136] La fourragère est une décoration récompensant une unité militaire, portée par ses membres en uniforme exclusivement durant leur temps de service. https://eodnedex.blog4ever.com/desobusage-1919.

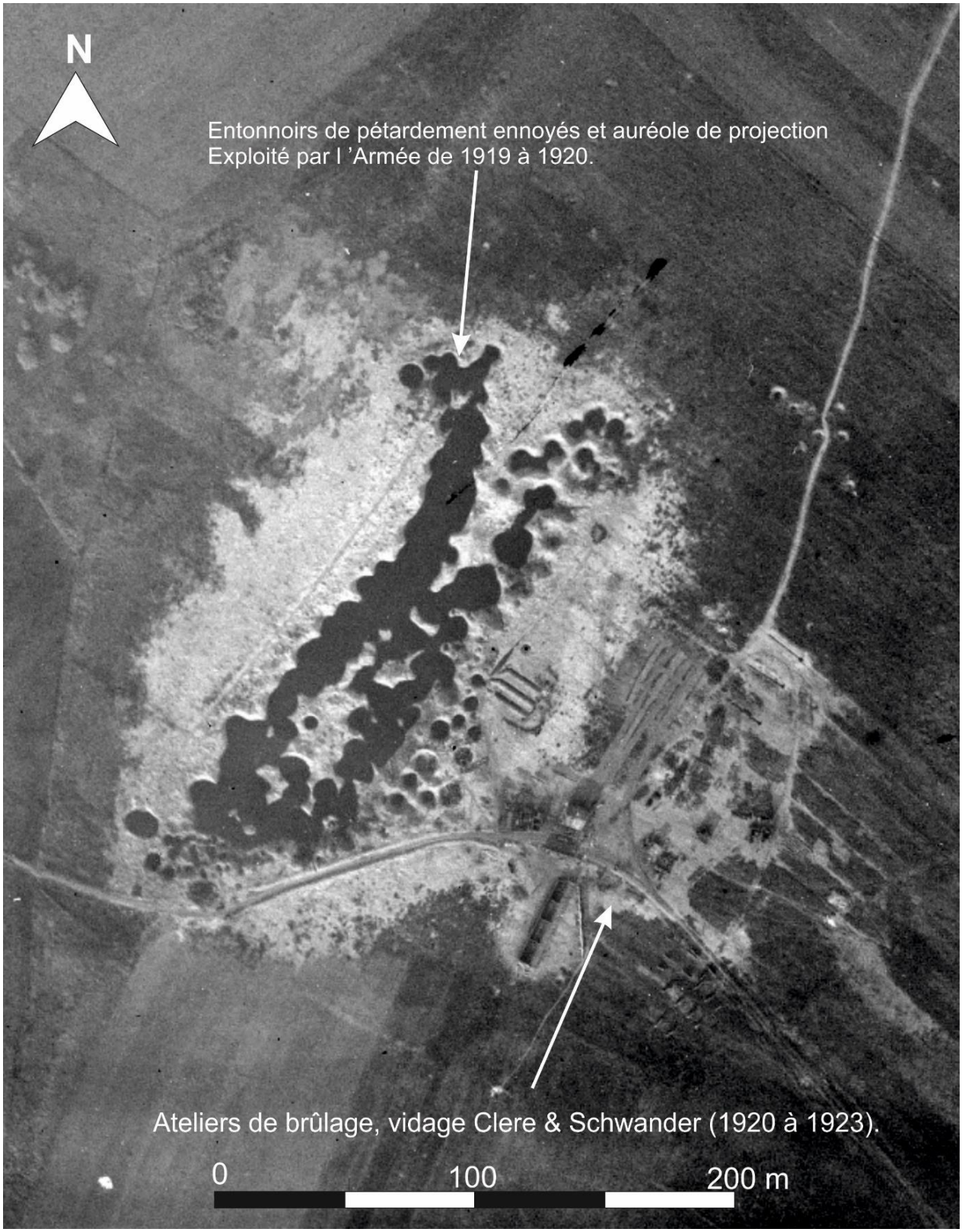


Figure 170 : Vaste champ d'éclatement de Vaudoncourt (département de la Meuse) montrant l'auréole de projection et des enfilades de vastes entonnoirs d'explosion envahis par les eaux de la nappe phréatique dont le toit a été éventré par les détonations successives. Des installations industrielles de neutralisation de munitions ont été installées contre le champ d'éclatement vers 1920 une fois les pétardements achevés sur ce site[1137].

[1137] Extrait du cliché IGN, 1922. CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018, cliché n°18.

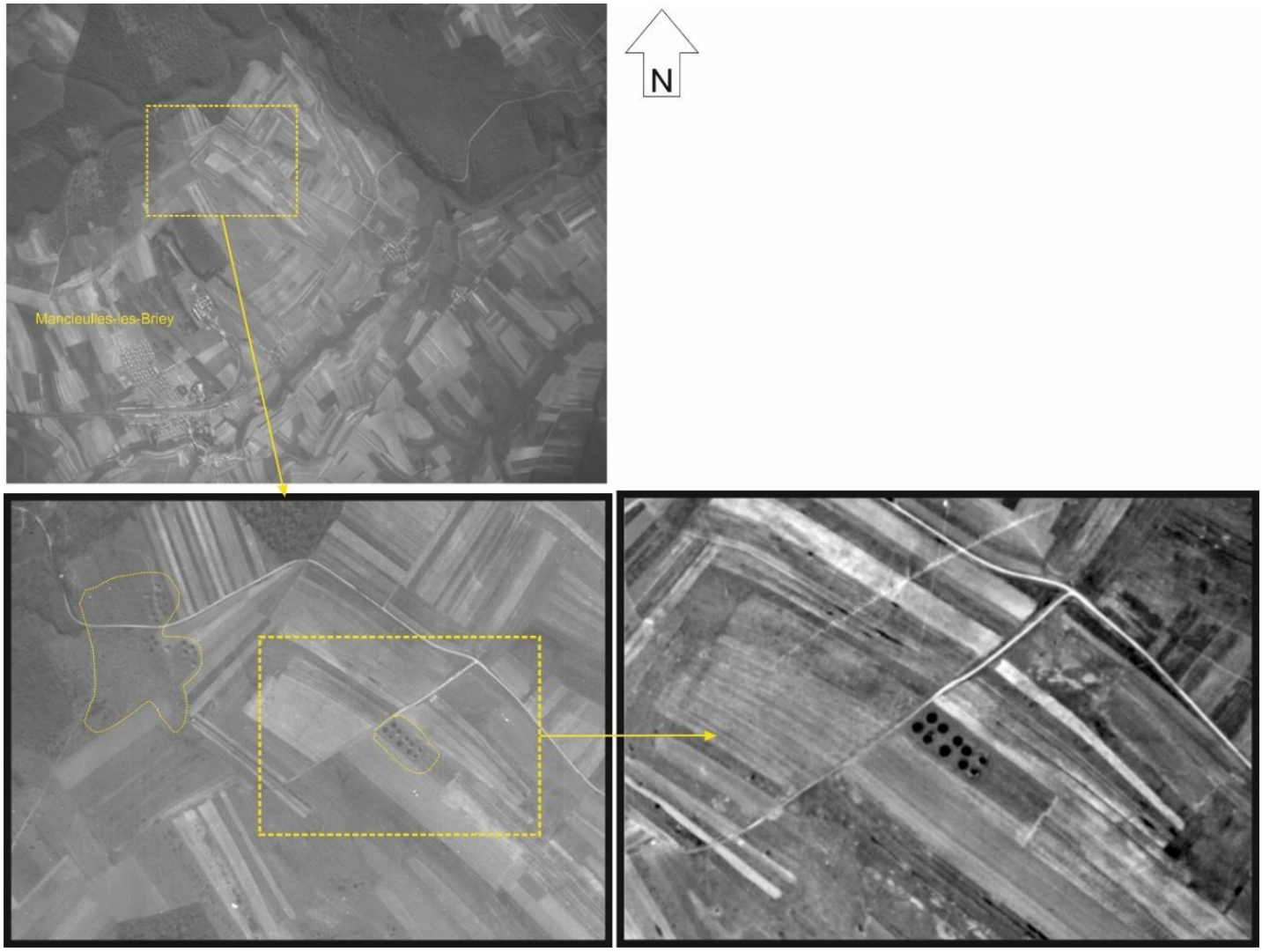


Figure 171 : Terrains d'éclatement associé aux anciens dépôts ex-allemands à proximité des anciens ateliers de chargement avancés de munitions chimiques de Mancieulles-les-Briey (département de la Meurthe-et-Moselle[1138]).

Une fois l'exploitation des terrains d'explosion achevée, les entonnoirs étaient débarrassés des ferrailles résiduelles et des éventuelles munitions non explosées encore présentes. Les terrains d'explosions furent dans le grande majorité des cas remblayés par les matériaux éjectés. S'ils ne l'étaient pas, et laissés tels quels à l'abandon « *l'action des pluies tends à combler les entonnoirs*[1139] ». L'expérience et diverses observations effectuées sur le terrain dans le cadre de cette recherche montrent que ces sites de destructions peuvent encore régulièrement livrer à l'affleurement des munitions et des fragments de munitions, ce dont les artificiers des années 20 avaient parfaitement conscience « *Il sera cependant utile de visiter périodiquement les champs de destruction abandonnés ainsi que leurs abords immédiats. Il se pourrait que des engins apparaissent à la suite de pluies abondantes où à la fin de l'hiver*[1140] ».

[1138] Extrait du cliché IGN, IGNF_PVA_1-0__1958-06-16__C3312-0081_1958_CDP1332_0485.

[1139] Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Commission Centrale de la Récupération. Le Lieutenant – Général, Président de la CRR à Monsieur le Ministre de la Défense Nationale, Cabinet. Bruxelles, le 21 septembre 1922. Signé. Tollen. Rapport relatif au Service des munitions en date du 15 septembre 1922.

[1140] *Ibid.*

Protocoles opératoires spéciaux dédiés aux munitions chimiques à chargement liquide

Si les artificiers de l'Artillerie qui désobusaient étaient coutumiers des obus explosifs, dont ils maîtrisaient l'élimination par éclatement, il en était tout autrement des projectiles dangereux qui marquèrent la fin de la guerre : les obus chimiques allemands chargés d'*Ypérite*, intransportables car fuyards. Ces engins, équipés de fusées scellées au corps de l'obus par un joint de ciment magnésien, ne pouvaient être désamorcés aisément. Leur destruction sur le lieu de leur découverte s'imposa faute d'autres solutions. La Direction des Services de la guerre chimique, rattachée au Ministère de la Guerre, transmit alors en mars 1919 des consignes aux artilleurs pour éliminer ces projectiles au plus proche de leur lieu de découverte tout en garantissant de bonnes conditions de sécurité[1141]. Dans un premier temps, un emplacement éloigné d'au moins 500 m des habitations, des sources et des puits, dû être identifié. Ensuite, une tranchée à parois verticales de 0,7 à 1 m de large pour 2 m de profondeur fut creusée. Une des parois fut garnie d'alvéoles, chacune d'elles garnie d'une couche de chlorure de chaux, accueillant un projectile et une charge de 135 g d'explosif placés parallèlement à l'axe des obus. Ce dispositif était clairement destiné à éviter les projections de gouttelettes d'*Ypérite* lors de l'éclatement. Des cordons détonants instantanés actionnèrent les pétards, simultanément. Si l'explosion simultanée n'était pas envisageable, un trou de 2 m de profondeur était ouvert et chaque projectile fut éclaté isolément. Les personnels en charge de ces destructions disposaient de protections individuelles : masques, gants moufles en toile huilée. Enfin, une fois terminées les destructions, les entonnoirs d'éclatement étaient saupoudrés de chlorure de chaux (qui neutralise l'*Ypérite* résiduelle) et remblayés. Parfois même, ils furent laissés tels quels, à l'abandon, et alors progressivement envahis par la végétation et l'eau qui stagnait au fond des entonnoirs.

6.5. RECUPERATION ET DESTRUCTION DE MUNITIONS PAR LES FORCES ALLIEES EN FRANCE ET EN BELGIQUE

Les recherches publiées concernant l'élimination d'engins de guerre de la Première Guerre mondiale sur le territoire belge avant 1920 semblent inexistantes. Zanders, P. (1997) [1142] traite la question de la neutralisation des munitions chimiques présentes sur le sol belge au moment de la cessation des hostilités dans son chapitre intitulé *Destruction of old chemical munition in Belgium*. La récupération des munitions était principalement du ressort du Service de la Récupération (pour les Français, avec la mission française en Belgique) et du *Salvage* (pour les Britanniques). Le 28 février 1919 le Ministre de la Reconstitution Industrielle informa ainsi le Maréchal Foch que le Chef d'Escadron Delabrousse avait été désigné « *pour diriger en Belgique le service de la recherche et de la récupération du matériel français transporté dans ce pays par l'ennemi* »[1143]. Aucune information archivistique n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche concernant des opérations de récupération et/ou de désobusage menées par l'Armée belge. Les archives mettent en évidence que la récupération et le désobusage était d'abord une prérogative des forces françaises sur le sol belge.

En 1920, possiblement du fait du départ des troupes britanniques et françaises, un organe spécifiquement dédié à la récupération et au désobusage fut créé en Belgique : le Service de Destruction des Munitions (SDM), rattaché à la Commission Centrale de la Récupération (CCR). En Flandre occidentale où se concentrèrent l'essentiel des combats en Belgique, le SDM fut assisté par une autre branche de la CRR, dénommée le Service des Régions Dévastées (SRD).

[1141] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Direction des Services Chimiques de Guerre. Note pour la Destruction de Projectiles à Yperite Fuyard. Paris, le 27 mars 1919. Signé : le Général, Directeur des Services Chimiques de Guerre. Ozie.

[1142] Zanders, P. (1997). *The Destruction of Old Chemical Munitions in Belgium*, pp. 197-230, In T. Stock & K. Lohs (eds.). *The Challenge of Old Chemical Munitions and Toxic Armament Wastes*. SIPRI Chemical & Biological Warfare Studies, no.16, SIPRI and Oxford University Press, Oxford.

[1143] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est (Pétain ?). du GQGA du 5 mars 1919. P.O. le Major Général Weygand.

L'*American Expeditionary Force* s'affaira aussi au désobusage dans les secteurs où stationnèrent les armées, en Lorraine, Champagne et Picardie, en opérant suivant un schéma et des priorisations des destructions similaires à ceux retenus par l'Armée française. Entre novembre 1918 et juillet 1919, au sein de l'AEF, la récupération des matériels se renforça et les opérations d'élimination des engins épars ou en dépôts s'organisèrent en s'accélérant aussi avant la démobilisation et le retour au pays rapide des troupes.

Le *Salvage*, qui dirigea le désobusage, comportait en décembre 1918, rien que pour le secteur de la Ier Armée, quelque 11 000 hommes[1144] (organisés en « bataillons de travail ») dont l'objectif était de débarrasser, manuellement, les tranchées, les champs, les villages, les anciennes batteries d'artillerie et les anciens dépôts divisionnaires de munitions abandonnés. Ils étaient appuyés par 250 artilleurs.

En décembre 1918, le fonctionnement du *Salvage* s'avéra loin d'être satisfaisant en raison notamment du manque de main-d'œuvre pour la récupération, le tri et la mise en dépôts des matériels récupérés. Ce que craignirent alors les officiers américains, c'était que la récupération s'éternisât et que des matériels alors réutilisables sur le front s'altérèrent avec le temps, faute « de *prise en main suffisamment rapide, et deviennent alors progressivement inutilisables ». 14 Salvage Companies* étaient d'active en Meuse, Meurthe-et-Moselle, Luxembourg et Vosges au sein de la IIe Armée du 10 octobre 1918 au 20 mars 1919.

Les munitions ex-allemandes récupérées sur le terrain par l'AEF et en état de fonctionnement furent désamorcées par le retrait des fusées avant leur expédition sur le BOD (*Base Ordnance Dump*) n°5 à Sainte-Loubès (département de la Gironde)[1145]. Il s'agissait d'une quantité considérable de 9 000 tonnes de munitions ex-allemandes de tout type[1146]. Les motivations de ce transport vers la Gironde, la façade atlantique, du matériel ex-allemand ne sont pas explicitées dans les archives consultées (immersion au large ? butin de guerre à rapatrier aux USA ?). Les projectiles d'artillerie de tranchée américains, de confection britannique, *Stokes* de 3 *inch* ainsi que les grenades non explosées étaient rassemblées pour être expédiées Outre-Rhin par camion au terrain (puits) de destruction (*demolition pit*) de Bassenheim à proximité de Coblence en Allemagne[1147], en secteur américain en rive gauche du Rhin (cf. Section 10h). Ce secteur était tenu par la IIIe Armée d'occupation alors encore présente en Europe alors qu'en France l'AEF s'était rapidement retirée.

Des méthodes de pétardement spécialement dédiées aux engins ex-allemands sont décrites dans des documents conservés aux archives nationales à Washington[1148]. Des trous 1,50 m de profondeur pour un 1,80 m de long étaient creusés dans le sol. Les obus de gros calibre était placés au fond du trou, disposés en roue, les ogives orientées au centre où fut apposée une charge de dynamite ou un «*potatoes-mas*her »[1149] pour initier l'explosion de destruction. Ces grenades étaient au préalable sécurisées par le retrait de leur détonateur. Les engins de plus petit calibre étaient placés dessus selon la même disposition. Un cordon de sécurité détonant de type *Bickford n° 11 Mk.1* fut ensuite inséré dans une des grenades qui, une fois ainsi équipée, était placée précautionneusement au centre du fourneau d'explosion. Le cordon détonant était coupé de sorte que la détonation se produise à minima à 5 min après son allumage (au moins 2,1 m sachant que le cordon se consume à 45 seconde par pied). Le fourneau était ensuite recouvert de terre.

[1144] National Archives, Washington D.C, number RG 120, NM-92-2010, Box n°5. Ordnance field headquarter, SOS, AEF. Souilly, December 14, 1918. Processing of board of Officers convened by O. O. 341, GHQ. p. 3.

[1145] National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-92-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer, Jean-les-Buzy to Chief Ordnance Officer AEF, Tours.

[1146] National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-92-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer AEF, Souilly, to Chief Ordnance Officer AEF, december 10th, 1918. Signé : H.H. Stout, Lt. Col. Ord.

[1147] National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-91-1286, Box n° 1654. Headquarter Third Army AEF, may 16th, 1919. From Chief of Staff, Third Army to Chief Officer Salvage Unit # 301 « Disposition of property ». Signé : Malin Graig.

[1148] National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1 – 71.1. Report of method of demolishing salvage German ammunition.

[1149] « Presse-purée », terme employé par les soldats pour désigner les grenades à manche allemandes.

L'expérience montra que les destructions ainsi réalisées étaient efficaces lorsque les fourneaux étaient chargés de 20 engins de 77 mm et une caisse de 25 grenades à main. Ce mode opératoire était similaire à celui adopté par les artificiers Français. La photographie de la Figure 172 montre un fourneau de destruction de projectiles de gros calibre (420 mm de l'obusier lourd « Grosse Bertha ») organisé suivant le design décrit ci-avant.

Figure 172 : Un aviateur américain pose tenant l'ogive d'un projectile de 420 mm d'obusier « Grosse Bertha » à l'arrière-plan, un fourneau de pétardement des obus de 420 organisé en rosace à l'extrémité d'une voie 60 cm Decauville. Mémorial Romagne-sous-Montfaucon. Les projectiles sont disposés en roue au sein du fourneau, ogives face à face, face à la charge explosive qui initiera la détonation[1150].

Rares sont les images montrant des opérations de destruction de munitions menées par les armées dans l'immédiate sortie de guerre. Quelques séquences tournées en France (non datées, non localisées) montrent (i) les détonations successives de fourneaux, (ii) la constitution de fourneaux chargés de bombes de tranchée « Crapouillots » et de grenades conditionnées en caisses, (iii) l'éclatement de grenades et (iiii) le brûlage en tranchée (*Open Burning*) de gargousses d'ergols nitrocellulosiques. Elles sont conservées à l'ECPAD (Établissement de communication et de production audiovisuelle de la Défense) sous la cote VTS_01_3 14.18 A 586.

Un second film, sous la cote VTS_01_1 14.18 A 1259, portant sur la remise en état des sols en France, consacre une longue séquence à la préparation par des artificiers civils de fourneaux, leur amorçage et leur détonation (non daté, non localisé).

Les opérations de récupération de munitions par l'AEF en Meuse furent filmées et commentées dans les scripts conservés aux Archives Nationales à Washington D.C.[1151]. Le document fut tourné par l'AEF en janvier 1919. Il montre les artificiers américains de la *Reclamation and Demolition Department, Ist Army* à l'œuvre.

[1150] Mémorial, Cimetière américain de Romagne-sous-Montfaucon (département de la Meuse).

[1151] National Archives, Washingon D.C., number 111-h-1485-r2.

Ce film exceptionnel comprend une succession de plans séquence de destructions de projectiles, depuis un engin isolé épars (obus de 155 mm français tiré pétardé par le Sergent C.M. Cangdom, *Ordnance Department*, le 28 janvier 1919 à Romagne-sous-Monfaucon) jusqu'au pétardement en masse et in situ du grand dépôt ex-allemand de Lissey le 20 juin 1919. Ce dépôt de la voie stratégique Meuse-Argonne / Woëvre renfermait 3 000 obus et 1 800 grenades. La succession des séquences suit clairement un fil crescendo dans l'importance des destructions, partant d'une munition isolée pour s'achever sur de longs plans « en apothéose » du pétardement massif des grands dépôts destinés à impressionner le spectateur. Des plans sont aussi consacrés à l'inspection post-détonation, d'autres à l'enlèvement des munitions des sols, par une main d'œuvre militaire majoritairement afro-américaine[1152]. Les photographies de la Figure 173 et de la Figure 174 sont tirées de cet ensemble filmographique.

[1152] National Archives, Washingon D.C., number 111-h-1485-r2.

Figure 173 : Préparation d'un fourneau de pétardement par la Reclamation and Demolition Department, 1st Army. 13 janvier 1919. Romagne-sous-Montfaucon (département de la Meuse). Le fourneau est composé d'obus allemands de 77 mm longs, de deux projectiles allemands de 210 mm[1153].

Figure 174 : Pétardement US du dépôt de munitions ex-allemande de Lissey (département de la Meuse).

[1153] https://history.army.mil/html/bookshelves/resmat/wwi/pt04/ch26/pt04-ch26-sec04.html#lg=1&slide=12

7. L'urgence d'éliminer les anciens dépôts chimiques ex-allemands de Spincourt et de la Hardt. Premières tentatives ajournées du désobusage contractuel privé

7.1. VERS UNE DEMOBILISATION MILITAIRE ET UNE MOBILISATION INDUSTRIELLE POUR DESOBUSER

Les Ministères de la Guerre et des Régions Libérées désiraient pérenniser les actions de récupération et de désobusage pour poursuivre les reconstructions au-delà de la période de mobilisation des personnels militaires, français comme alliés. Par ailleurs, certains dépôts, qu'il s'agisse de ceux dans leur état d'abandon de la fin des hostilités ou encore ceux (de rassemblement) constitués par les armées postérieurement à novembre 1918, étaient tellement vastes que la main d'œuvre du Service de la Récupération jusqu'alors employée au nettoyage des anciens champs de bataille n'était en mesure ni de les détruire, ni de les évacuer.

Dès début 1919, le recours à de la main d'œuvre civile placée sous la responsabilité d'entrepreneurs privés fut envisagé par le GQG pour mener certaines opérations de récupération et de liquidation de dépôts bien particulières. Il s'agissait non seulement de la récupération et du désobusage au droit et aux abords des anciens champs de bataille mais aussi et surtout (i) de la liquidation dans les anciennes zones des armées des vastes dépôts ou centres de rassemblement de circonstance générés par les opérations de récupération durant la guerre et dans l'immédiate sortie de guerre et (ii) du déclassement des engins en surplus dans les réserves réglementaires à l'arrière. Il s'agissait aussi de préparer la transition d'une récupération militaire vers une récupération civile en prévision de la démobilisation des personnels sous les drapeaux. En janvier 1919, le Maréchal de France, Commandant en chef des Armées françaises de l'Est (Maréchal Pétain) s'adressa à Georges Clémenceau, alors Ministre de la Guerre et Président du Conseil en ces termes « *En raison de la diminution progressive des moyens mis par les armées à la disposition des services de la récupération et de reconstitution, j'estime qu'il y aurait que des avantages à passer à des entreprises civiles une partie de la récupération dans les anciens champs de bataille*[1154] », préfigurant par là une organisation de la récupération et du désobusage qui ne fut mise en place de façon opérationnelle qu'en 1920. Mais pour le Ministère de la Guerre, et la direction à qui furent confiées ces missions, celle de l'Artillerie, gérer des contrats pour neutraliser les restes et épaves de cette guerre en temps de paix était nouveau, inattendu. Les premières indications archivistiques du transfert des opérations et responsabilités de la sphère militaire vers le monde civil datent de l'été 1919.

7.2. PREMIERES TENTATIVES DE CONTRACTUALISATION AVEC DES ENTITES PRIVEES

Les tentatives de contractualisation avec des entreprises privées pour ces opérations particulières les plus anciennes identifiées dans les archives (i) visaient de vastes dépôts ex-allemands renfermant majoritairement des projectiles à chargement chimiques (dépôts de la *Hartwald* et le dépôt de rassemblement de Spincourt), (ii) concernaient une seule entreprise de raison sociale Clere & Schwander (du nom des deux associés à la tête de l'entreprise), encore identifié sous le nom *Société anonyme de récupération de munitions* dont le siège était à Paris, 62, rue de Tocqueville.

[1154] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du 21 janvier 1919 du Maréchal de France Commandant en Chef des Armées Françaises de l'Est à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Paris. Signé. Régnier.

Un premier contrat civil fut conclu le 7 juillet 1919 entre le Ministère de la Guerre, le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) et l'entreprise Clere & Schwander pour l'élimination sur place des huit dépôts ex-allemands implantés dans ou à proximité de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*), à l'est et au sud-est de Mulhouse (département du Haut-Rhin). Il s'agissait des dépôts de Bartenheim (ou Falbruck). Fortsweg, Hartwald, Grünhütte, Hombourg, Petit Landau, Schlierbach et Battenheim, totalisant 8 400 tonnes de munitions. 517 tonnes de bombes de tranchées (*Minen* de Minenwerfer) issues de ces dépôts étaient réservées pour une autre société, l'entreprise (Pascal) Bouxin[1155], qui exploitait aussi un terrain de destruction en forêt de la Hardt (parc de munitions de Jettingen)[1156].

Un contrat pour la liquidation des stocks d'obus du dépôt de Spincourt fut ensuite conclu entre le sous-secrétaire d'Etat aux Finances, (Liquidation des stocks) représenté par M. Paul Morel le 17 septembre 1919**,** suivi d'un avenant au contrat un an plus tard, en date 20 septembre 1920[1157] « *Le marché comporte la reprise des obus de tous calibres, douilles, fusées, cartouches, engins de tranchées à gaz et explosifs, grenades, ainsi que tous les artifices et emballages se trouvant entreposés dans le dit dépôt* » (Article 1). Le délai imparti à la destruction de ce dépôt était initialement de 12 mois (Article 2 du contrat initial de septembre 1919).

Les engins étaient cédés à l'entrepreneur contre le versement au trésor d'une redevance.

7.3. UNE CONTRACTUALISATION EN GRE A GRE POUR PARER A L'URGENCE D'OPERATIONS EXCEPTIONNELLES

Aucune consultation préalable, ni mise en concurrence selon les obligations du Code des Marchés publics, n'ont été identifiées dans les archives collectées préalablement à ces contractualisations. Il apparaît vraisemblable que les marchés aient été passés selon une procédure simplifiée et accélérée de gré-à-gré. Le Décret du 18 novembre 1882 et l'instruction du 31 juillet 1889 relatifs aux adjudications publiques et aux marchés passés au nom de l'Etat, prévoyaient en effet[1158] « *Art. 1er. Les marchés, de travaux, fournitures ou transports au compte de l'Etat sont faits avec concurrence et publicité, sauf les exceptions mentionnées à l'Article 18 ci-après […]. Art. 18. Il peut être passé des marchés de gré à gré : […] Pour les fournitures, transports ou travaux qui, dans les cas d'urgence évidente' amenée par des circonstances imprévues, ne peuvent pas subir les délais des adjudications* ». Il est donc vraisemblable que le recours au gré à gré répondait aux clauses d'impérieuse nécessité, pour réduire au maximum les délais entre la contractualisation et l'engagement opérationnel des destructions. Il est aussi possible que le nombre d'entreprises considérées comme possédant les compétences requises et une organisation adaptée, pour mener de telles opérations encore inédites, ait été extrêmement limité. Les raisons ayant motivé le choix de l'entreprise Clere & Schwander ne sont pas explicitement exposées dans les archives consultées.

Face à l'urgence, ces premiers marchés furent possiblement attribués aux entreprises les plus offrantes, s'étant immédiatement présentées au Ministère de la guerre en proposant leurs services.

[1155] L'alsacien Pascal Bouxin est un ancien artilleur d'active durant la Grande Guerre ; il est le fils de l'adjudant Bouxin qui dégrada le 5 janvier 1895 dans la cour de l'Ecole militaire (Paris) le capitaine Alfred Dreyfus (35 ans), issu d'une riche famille juive d'Alsace.

[1156] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Corps d'Armée. Gendarmerie nationale. Rapport du Lieutenant Ducey Commandant la Gendarmerie de la Section sur l'explosion d'un projectile de guerre. Altkirch, le 31 mai 1922.

[1157] Centre des Archives Economiques et Financières, cote 43 25-1. Avenant du 20 septembre 1920, signé : Général Lequime, commandant d'artillerie du 6e C.A. et de la 6e Région. Approuvé à Paris le 11 octobre 1920 par le Sous-Secrétaire d'État aux Finances chargé de la Liquidation des Stocks.

[1158]Bibliothèque nationale de France. *Décret du 18 novembre 1882 et l'instruction du 31 juillet 1889 relatifs aux adjudications publiques et aux marchés passés au nom de l'Etat*. Fait à Paris, le 18 novembre 1882. Signé : Jules Grévy. Par le Président de la République. Le Ministre des finances, Signé : P. Tirard.

On rappelle qu'en janvier 1919 déjà, soit deux mois à peine après l'arrêt des hostilités, Clere & Schwander adressa une demande d'enlèvement des épaves de guerre au droit des anciens champs de bataille de Reims, Soissons, Chauny, Laon et d'Asfeld (appartenant à la 2e Régions militaire)[1159]. Les suites à donner à cette demande furent examinées lors d'une conférence interministérielle qui se serait tenue à Paris le 19 mars 1919. Les décisions ne sont pas renseignées dans les archives consultées, mais les munitions rassemblées dans le dépôt de Spincourt provenaient explicitement des secteurs visés par Clere & Schwander, un dépôt qui fut démoli par cet industriel.

Quelle aurait été cette impérieuse nécessité ayant motivé le recours à la procédure de gré à gré ?

Pour le dépôt de Spincourt, il y eut possiblement un jeu de circonstances. Le centre de rassemblement de munitions de Spincourt atteignit dès 1919 des dimensions exceptionnelles au grand dam des populations et autorités civiles locales laissées dans l'incompréhension d'une telle accumulation et dans l'angoisse d'éventuelles explosions accidentelles. Le 17 mai 1919[1160] une première explosion accidentelle, bien que ne causant que des dégât matériels, provoqua un mouvement de panique dans le village de Spincourt. Un second incident, daté du 6 septembre 1919, est relaté par un Article du journal *L'Éclair de l'Est* intitulé « *Spincourt sur un volcan*[1161]». La loi du 17 avril 1919, signée peu de temps avant ces évènements stipulait que les dégâts matériels, dommages aux biens et aux personnes, étaient à la charge de l'Etat. Ces incidents étaient une preuve irréfutable de l'urgence pour l'Etat à éliminer de tels dépôts pour protéger les populations mais aussi l'Etat dont la responsabilité était engagée selon les clauses de la loi du 17 avril 1919. Puis, comme cela a été explicité dans ce qui précède, il fallait hâter les démolitions tant que la main d'œuvre militaire et des PG étaient encore disponibles et mobilisables pour les tâches de la récupération et du désobusage.

Le dépôt de Spincourt était majoritairement constitué d'engins chimiques ex-allemands issus de récupérations. La nécessité des démolitions de tels dépôts semblât s'être s'imposée *de facto* comme une évidence arrivant à contre-pied des instructions officielles de la note du GQG n°6. 171 du 19 novembre 1918 qui demandaient que les tous les projectiles à chargement chimiques ex-allemands soient rassemblés sans distinction et que les munitions ex-allemandes soient détruites « *sauf les spéciaux* », ainsi que celles rassemblées dans l'Annexe 2 de la note du GQG du 7 juillet 1919.

7.4. TRANSFERT CONTRACTUEL DES RESPONSABILITES

La passation de marchés avec des entrepreneurs privés étaient alors aussi un moyen de transférer la responsabilité de l'Etat sur un tiers, ce qui transparait très distinctement à la lecture des Articles du marché de septembre 1919 pour la démolition du dépôt de Spincourt. Les Articles 7 et 9 répartirent les responsabilités en cas d'accidents « *La société décline toute responsabilité pour les accidents causés par la malveillance (machine infernale, appareil à explosion retardée, etc.) mais prend l'entière responsabilité des accidents causés par ces travaux ; cette responsabilité commence au moment où les obus enlevés du dépôt ont été livrés dans un chantier de démolition* » (Article 7). « *Tout dégât dûment constaté qui viendra se produire malgré l'application des mesures prévues par ledit régime [ndlr : fixant d'accord avec les autorités locales], restera à la charge de la société* » (Article 9)[1162]. Mais aucune démolition contractuelle ne semblât avoir été réellement engagée au sein des dépôts de Spincourt et du *Hartwald* avant le second semestre 1920. Ce qui suit, en propose une explication.

[1159] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, Matériel, 8e Section. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à Monsieur le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est. Récupération et destruction de projectiles et de munitions déclassées, *op. cit.*

[1160] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Rapport du lieutenant Mathis de la 2e Compagnie de gendarmerie des Ardennes, arrondissement de Montmédy, daté du 20 mai 1919, communiqué au préfet de la Meuse le 23 mai 1919.

[1161] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. *L'Éclair de l'Est « Spincourt sur un volcan ».*

[1162] Centre des Archives Economiques et Financières, site de Savigny-le-Temple, cote 43 25-1. Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt. 17 septembre 1919, *op. cit.*

7.5. LA SUSPENSION DU CHANTIER DE SPINCOURT : SE LAISSER DU TEMPS POUR LA SECURITE

7.5.1 Renforcer les contrôles et les mesures de sécurité

A Spincourt, l'avenant au contrat initial du 19 septembre 1919 signé, un an plus tard, en septembre 1920 visait notamment le versement, pour sécurité et garantie de l'exécution des obligations de l'entreprise, un cautionnement de 10 000 Fr. Il comportait par ailleurs de nombreuses clauses techniques concernant les modalités de destruction des munitions et de neutralisation des toxiques de guerre, et les mesures de sécurité individuelles et collectives adoptées pour ces opérations. L'exécution du contrat de septembre 1919 semble en effet avoir été suspendu aux exigences de l'avenant au marché initial demandant le versement de garanties financières pour le respect des obligations contractuelles et le renforcement des procédures de sécurité. Les clauses de cet avenant insistaient sur le renforcement drastique des contrôles par les instances techniques compétentes (les personnels des Parcs de l'Artillerie). Il est ainsi stipulé dans l'Article 1 de l'avenant de septembre 1920 « *M.M. Clere & Schwander devront avant d'entreprendre l'exécution de leur marché, faire approuver :*

> *L'emplacement des ateliers et leur compartimentage, l'organisation des dépôts journaliers, le tonnage maximum de chacun deux,*
>
> *L'emplacement des foyers et machines, celui des centres d'explosion et de destruction,*
>
> *Les mesures d'épandage des eaux, le mode de destruction, de neutralisation des produits nocifs,*
> *L'organisation du travail en vue de protéger les accidents ainsi que la réglementation du service des ateliers au point de vu balayage, nettoyage, etc.,*
>
> *Les mesures contre l'incendie ».*

Puis

« Aucune opération de transport, manipulation, démolition ne pourra être commencée sans l'autorisation du général commandant l'artillerie ou son délégué ».

En septembre 1920, le chantier de Spincourt n'était donc pas encore commencé. Celui de la Hardt était en activité depuis avril 1920.

7.5.2 L'explosion accidentelle de la Hardt du 13 avril 1920, conséquence dramatique des manquements aux consignes élémentaires de sécurité

L'explication de ces délais de suspension du contrat, qui contrastent avec l'urgence initiale de contractualiser, du renforcement des garanties, des procédures de sécurités et de contrôle, et d'une plus grande transparence sur les modes opératoires, est peut-être à rechercher avec des évènements survenus dans la Hardt. Le 13 avril 1920, une violente explosion accidentelle survint dans le dépôt de Bartenheim et tua 13 ouvriers et un militaire occupés à décharger des grenades. « *La détonation fut épouvantable et ses effets terribles. Tout vola en éclats. Les malheureux ouvriers occupés à décharger des projectiles furent projetés dans les airs, déchiquetés, dénudés. Des morceaux de chair humaine, un tronc même se trouvait dans un arbre à 100 mètres de là. Les rails de la voie construite par les Allemands ont été écartés, brisés. Dans ce dépôt il y avait 30 000 grenades à poire, dont 3 à 400 seulement ont explosé, ce qui laisse à supposer que les manipulateurs sont tombés sur une machine infernale déposée à cet exprès [sic] par les boches*[1163] ».

[1163] Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 14 avril 1920.

« *Le déchargement des munitions du camp de Bartenheim avait été entrepris par la maison Schwander et Clers [sic] qui avait commis, pour la direction de ces travaux l'ingénieur Eugène Hass de Mulhouse*[1164] ». L'affaire fut portée devant les tribunaux en octobre 1920 et jugée avec une condamnation d'Eugène Hass « *Le tribunal est d'avis que le chef d'équipe Chabert qui a été tué, est coupable en effet de négligence, mais que Hass n'en a pas moins manqué de prudence en laissant les ouvriers entrer dans le chantier avant que les mesures de précaution aient été prises. En conséquence il le condamne à 3 mois de prison avec sursis et 600 francs d'amende*[1165] ». Cet accident mit en exergue des manquements notoires aux consignes de sécurité les plus élémentaires au sein de l'entreprise Clere & Schwander, motivant certainement une suspension des chantiers Clere & Schwander et une révision des contrats vers un renforcement des contrôles par l'autorité militaire et un durcissement des mesures de sécurité.

7.5.3 Recherche d'un cadre à la sécurité interne et externe des chantiers. L'inadéquation aux opérations de la réglementation du temps ordinaire

A Spincourt, une demande de classement administratif au titre des Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1re Classe)[1166] fut instruite[1167]. L'avis d'enquête de Commodo et Incommodo était daté du 15 mars 1920. L'arrêté préfectoral prescrivant l'enquête fut signé à Bar-le-Duc, le 30 avril 1920, par le préfet de la Meuse, P. Emery, dans lequel on peut lire en propos liminaire « *Le terrain de ce dépôt a été mis, par l'autorité militaire qui l'occupe, à la disposition de la Société pétitionnaire par un contrat en date du mois de septembre 1919. L'installation projetée a pour but de démonter et vider les projectiles existants dans le dépôt de Spincourt […]* [1168]».

A-t-il été informé de ce qui s'était passé à Bartenheim une semaine plus tôt ?

Le quotidien *Le Bulletin Meusien* du 30 mai 1920 en fit publicité et se tint le 2 juin 1920 une séance extraordinaire du Conseil municipal de Muzeray durant laquelle purent s'exprimer la désapprobation du projet et des protestations « *contre l'établissement d'une usine à Muzeray pour le démontage des obus toxiques et explosifs*[1169] » se soldant par cette délibération « *Le Conseil maintient son avis défavorable sur le projet* ». Pourtant l'usine fut installée d'office. Fin 1920 des baraquements avaient été installés pour accueillir les ouvriers de l'usine « *La fille Cloès vivait en concubinage depuis un mois dans un des baraquements servant à loger les ouvriers de l'entreprise Clère et Schander*[1170] [sic]». Il apparaît peu probable que le processus de classement au titre des établissements insalubres ait été mené à son terme. Ce processus de classement, s'il pouvait être pertinent et adapté pour des installations industrielles dangereuses du temps ordinaire, appelées à être exploitées sur un temps long, s'avéra inapproprié pour des opérations « extraordinaires », inédites, à réaliser en urgence dans des installations temporaires. Les délais d'instruction de la demande de classement, particulièrement longs, disproportionnés par rapport aux durées d'exploitation des installations de désobusage, ne permettaient pas par ailleurs de répondre à l'urgence des opérations.

[1164] Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 30 et 31 octobre 1920.

[1165] *Ibid.*

[1166] La première classe comprend les établissements qui doivent être éloignés des habitations.

[1167] Loi du 19 décembre 1917 modifiée relative aux établissements dangereux, insalubres ou incommodes « Les manufactures, ateliers, usines, magasins, chantiers et tous établissements industriels ou commerciaux qui présentent des causes de danger ou des inconvénients soit pour la sécurité, la salubrité ou la commodité du voisinage, soit pour la santé publique, soit encore pour l'agriculture, sont soumis à la surveillance de l'autorité administrative dans les conditions déterminées par la présente loi ».

[1168] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe). Etablissement d'une usine pour le Démontage d'Obus explosifs et toxiques à Muzeray. Enquête de Commodo et Incommodo. Signé : le Préfet de la Meuse. P. Emery. Bar-le-Duc, le 30 avril 1920.

[1169] Archives Municipales de Muzeray.

[1170] Bibliothèque nationale de France. Le Bulletin meusien, 12 décembre 1920.

7.5.4 Francis Norman Pickett & Fils à Trélon. L'exemple à suivre et à imposer ?

Enfin, un autre facteur pouvant expliquer « le coup de frein » donné par l'Etat aux opérations Clere & Schwander en Meuse et en Haute-Alsace peut être mentionné. L'avis d'enquête publique de Commodo et Incommodo du 30 avril 1920[1171] précisait que pour la neutralisation des « *Obus Toxiques - Les procédés employés sont les mêmes que ceux qui étaient employés aux ateliers de Vincennes et d'Aubervilliers mais sur une échelle beaucoup moindre* ». Ces méthodes internes au cercle militaire et industriel français du temps de guerre n'avaient rien d'innovantes et n'étaient peut-être pas totalement appropriées à des engins ayant « vieilli » pendant presque deux ans sur le terrain en plein champ. Le 19 mai 1920, l'industriel d'origine britannique, Francis Norman Pickett & Fils (cf. Section 10h du présent manuscrit) fut rendu adjudicataire du premier marché du « Temps de Guerre » par le Commandement de l'artillerie de la 1re Région militaire (Parc d'Artillerie de Douai) opérant pour le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), pour la démolition des munitions précisément ex-allemandes du centre de rassemblement de Trélon (dans l'Avesnois, département du Nord), totalisant 25 000 tonnes de munitions étrangères à dénaturer. Des négociations furent vraisemblablement engagées entre l'Etat français et Francis Norman Pickett & Fils avant la signature du contrat dit « français » de Trélon. C'est à Trélon que cet industriel expérimenta et développa, sous l'impulsion d'un ancien officier scientifique de l'armée russe, Michael Kostevitch, de nouvelles méthodes de destructions des engins de guerre, conventionnels comme chimiques, afin d'améliorer les conditions de sécurité et d'optimiser les rendements de récupération des matières valorisables constitutifs des engins pour en tirer un plus grand profit.

Le Ministère français de la Guerre s'adressa bien plus tard par écrit à Francis Norman Pickett le 31 mars 1924 en ces termes *« Vous me demandez mon opinion au sujet de la démolition d'obus à gaz. La destruction d'obus, etc. chargés de gaz toxiques constitue un problème pour lequel […] tout le monde a fait une grande erreur […]. Ceci est un fait avéré pour tous les pays, Alliés comme les autres. La destruction du gaz moutarde qui effrayait tout le monde, grâce aux expérimentations [.] faites avec obligeance […], devint extraordinairement simple. L'optimisation de cette méthode est de notre frais. Tous les autres gaz sont sujets à des mésententes, et vous avez été capables grâce à votre admirable organisation sans prétention financière. Je dois vous dire qu'actuellement, votre organisation a été rendue officielle dans toutes les usines françaises de destruction de munitions (Spincourt, Camp de Chalons, etc.)[1172] ».* La date à laquelle le « modèle et les modes opératoires » Pickett furent imposés par le Ministère de la Guerre dans les autres chantiers de démolition, dont ceux de Clere & Schwander, n'est pas connue. On ne peut exclure qu'ils furent pris en considération entre la signature du contrat initial Clere & Schwander de septembre 1919 et celle de l'avenant de septembre 1920 (le chantier Pickett de Trélon ayant été ouvert au printemps 1920), expliquant peut-être aussi la révision des modes opératoires visés par cet avenant.

Les investigations environnementales menées dans le cadre de cette recherche (cf. Section 3e) sur des sites F.N. Pickett & Fils en Meuse, comme dans les Hauts-de-France, et Clere & Schwander (Spincourt) montrèrent de grandes similitudes dans la nature et la configuration des pollutions des sols et donc en amont celles des procédés industriels mis en œuvre par ces deux entreprises qui les ont générées (cf. Section 11h du présent manuscrit).

[1171] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe), *op. cit.*

[1172] National Archives, Kew Gardens, London, number TS 36/227R. De Saint-Sauveur. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, Paris, 31st March 1924.

Entre fin 1919 et début 1920, Clere & Schwander fut encore dans une procédure de recherche et de recrutement de son personnel par voie de publicité dans la presse nationale « *Artificiers capables conduire équipe pour usine dénaturation obus, régions libérées. — Ecrire : Clere, 62, ure de Tocqueville. Wag. 74-79* [1173]» «*Artificiers capables diriger équipe chantiers récupération munitions. Ecrire avec références ou se présenter Clère Schwander, 82 rue de Monceau*[1174] ». La recherche de personnel se poursuivi jusqu'en juillet 1920[1175].

7.6. CONCLUSIONS

En conclusion, en marge du désobusage ordinaire placé sous autorité militaire depuis le début de la guerre, des opérations industrielles spéciales de démolition et de neutralisation de grands dépôts de munitions et matières dangereuses furent bel et bien confiées dès 1919 à au moins un entrepreneur privé, par contrat civil avec les organes d'Etat chargés de la Liquidation des stocks. Après l'entrée en vigueur de la loi du 17 avril 1919 engageant la responsabilité de l'Etat pour les dégâts matériels et les atteintes aux personnes causés par les engins de guerre, l'adjudication fut non seulement un moyen pour l'Etat d'être source de recettes et, mais aussi un levier pour respecter la loi en transférant la responsabilité à un tiers, le titulaire du marché en recherche de profit, dans un contexte où avec la progressive démobilisation des troupes et des PG se réduisaient la main d'oeuvre disponible. Les dimensions de ces dépôts étaient telles que la main d'œuvre militaire n'aurait su et pu y venir à bout.

Signé en 1919, les marchés conclus furent ajournés dans leur mise en œuvre opérationnelle, l'urgence dans la conduite d'opérations dangereuses exceptionnelles ne s'accommoda (i) ni avec le temps nécessaire à la définition et à l'application de règles strictes de sécurité, (ii) ni avec celui nécessaire pour fixer un cadre réglementaire du temps ordinaire. Les démolitions ne démarrèrent qu'au second semestre 1920. La question (i) de la légitimité de l'attribution des contrats initiaux de Spincourt et de *Hartwald* de 1919 à Clere & Schwander et (ii) des réelles compétences de cette entreprise au moment de la contractualisation, pour neutraliser à l'échelle industrielle ces vastes dépôts dominés par les engins chimiques (une opération inouïe à cette échelle) peut être posée. L'appropriation des méthodes et de l'organisation de la maison Pickett par le Ministère de la Guerre et celui des Régions Libérées et la demande vraisemblablement adressée à Clere & Schwander de se plier aux méthodes et moyens de F.N. Pickett & Fils, contribuèrent possiblement aussi à la suspension du chantier de Spincourt.

Pour le désobusage comme pour les reconstructions matérielles engagées au sortir de la guerre, une nouvelle organisation restait à inventer pour solutionner la question de la liquidation à grande échelle des anciens dépôts, ces amas hérités de la guerre et qui n'avaient plus raison d'être.

[1173] Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant*, 22 octobre 1919, *L'Intransigeant,* 23 octobre 1919, *L'Intransigeant*, 7 janvier 1920.

[1174] Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant,* 3 mars 1920.

[1175] Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant,* 24 juin 1920, L'Intransigeant, 5 juillet 1920.

8. Données relatives aux quantités de REG démolies à la fin 1919

Aucune archive concernant le tonnage et/ou le nombre d'engins de guerre éliminés entre l'armistice du 11 novembre 1918 et 1920 à l'échelle du front occidental n'a été identifiée dans le cadre de la présente recherche. Les informations, lorsqu'elles existent, sont locales et partielles.

Quelques données ont pu être collectées concernant le rythme des démolitions montrant que les opérations de destruction de REG étaient poussives ; ainsi pour le Soissonnais peut-on lire « *L'opération, périlleuse souvent, est lente toujours. Il n'était guère possible de faire sauter plus de 200 à 300 obus de 210 par jour*[1176] ». Les démolitions n'excédaient pas 2 000 tonnes par semaine, soit pour un tonnage de plusieurs centaines de milliers de tonnes, une durée estimative des opérations d'élimination des engins de guerre de plusieurs centaines de semaines, une durée incompatible avec les exigences du calendrier des reconstructions matérielles et des obligations de protection des populations.

Certains chiffres concernant des secteurs bien particuliers du front, reflètent l'importance des démolitions opérées sous autorité militaires avant 1920.

Rien que pour le Soissonnais (secteur du Chemin des Dames, département de l'Aisne), en 15 mois (de novembre 1918 à début 1920), 65 229 tonnes d'engins de guerre furent neutralisées[1177]. Dans l'Oise, à la date du 10 août 1919, quelques 699 127 grenades, 103 283 artifices divers, 270 415 obus d'artillerie de campagne, 36 957 obus d'artillerie lourde et 52 253 engins de tranchée et bombes d'aviation avaient été détruits par les artificiers, soit plus d'un million d'engins de guerre[1178]. En 1919 et 1920, 1 950 tonnes de projectiles furent détruits[1179] par un personnel réduit sur les anciens champs de bataille des Vosges (Haute-Alsace).

En Meuse, pour la seule journée du 24 décembre 1918, 24 314 projectiles et 58 049 grenades furent neutralisés par l'AEF. Au 10 janvier 1919, les quantités de munitions éliminées étaient de 456 608 projectiles d'artillerie et 1 342 675 grenades soit environ 1,8 millions engins de guerre abandonnés. Dans le secteur de la IIe Armée des Etats-Unis furent démolis entre le 22 janvier 1919 et le 20 mars de la même année, soit en trois mois, 1 006 753 obus explosifs, 1 314 639 grenades, 234 219 obus à chargement chimique, 641 mines, 4 817 fusées d'artillerie et 7 742 bombes de tranchées[1180] soit plus de 2,5 millions d'engins, au rythme moyen de 856 000 unités par mois. L'AEF aurait donc démoli en 1918 et 1919, sur les territoires où elle était stationnée, 4,3 millions d'engins.

Ces chiffres, même parcellaires, rendent compte de l'ampleur des démolitions d'engins dans l'immédiate sortie de guerre, qui se dénombrent par millions.

[1176] Bibliothèque nationale de France. *Lectures pour tous*, *op. cit.*

[1177] *Ibid.*

[1178] Archives départementales de l'Oise.*1914 – 1918. L'Oise au cœur de la Grande Guerre. op. cit.* p. 188.

[1179] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, Ire Section. Le 6 avril 1921. Signé : Salvaire.

[1180]National Archives Washington D.C., number RG-120 NM-91 Box n°1653. Captain QMC Chief Salvage Officer, 2nd Army. Signé: Max H. Neuman.

9. Résumé et conclusions de la Section 7h

Avant l'armistice, les tâches de la récupération et du désobusage militaire faisaient partie des missions routinières de l'Artillerie, de détachements de récupération, et de ceux des *Salvage* spécialement créés au sein des corps expéditionnaires britanniques et américains, sous commandement unique français, ou encore des *Sammelbataillon* chez les Allemands, dont l'objectif commun étaient de limiter le gaspillage au front dans un guerre hypeconsommatrice de matériels et de matières nécessaires à l'entretien de l'effort militaire et industriel de guerre.

Pour les Français, en 1914, la reconquête des territoires entre les rivières Marne et Aisne, à l'issue de la première bataille de la Marne, fut une première confrontation de l'Etat-Major avec une question jusque-là connue des militaires, depuis les premières guerres préindustrielles (Sécession, Crimée, etc.) mais restées sous les radars des préoccupations combattantes, celle de la gestion des Restes Explosifs de Guerre à l'issue des combats. Ces REG, toujours en puissance d'explosion, représentaient un réel danger pour ceux et celles qui venaient à les manipuler. Récupération et désobusage furent alors entrepris sous autorité militaire par l'Artillerie au cœur même de la guerre afin de sécuriser, sur les territoires reconquis, l'exploitation de terres agricoles qui allaient devenir lors de la stabilisation du front, les zones des Etapes et le grenier à blé des troupes et chevaux au front. A chaque fois que des mouvements du front avec gains territoriaux, aussi minimes soient-ils, furent effectivement constatés ou furent pressentis, comme en 1916 et 1917, se posa cette question cruciale au sein du GQG s'il fallait mobiliser ou non du personnel pour remettre en état ces sols et les restituer à un usage agricole en les expurgeant de leurs dangers pyrotechniques ou s'il était préférable de leur mettre entre les mains, non pas pelles et pioches, mais des fusils. La nécessité de ces opérations fit toutefois consensus.

La finalité de cette récupération était multiple (i) garantir la sécurité des populations civiles, (ii) libérer les terres fertiles de Champagne et Picardie des Restes Explosifs de Guerre pour restaurer les usages agricoles et (iii) se réapproprier matières et matériels propriétés d'Etat et butins de guerre.

Avec l'intensité des bombardements durant la guerre de position (1915-1917), selon les secteurs, et l'importance du taux de munitions dysfonctionnelles, les terrains furent localement minés et constellés par une multitude de munitions très variées, en calibres, chargements et origines, issues de toutes les parties, dont le nombre ne cessa de croître jusqu'à fin 1918. D'autres munitions furent délaissées en grand nombre, sur terre et sous terre, en vastes dépôts, précipitées dans les fossés, cours d'eau et étangs, à l'automne 1918 à la faveur de la retraite allemande sur les territoires situés à l'est des anciennes lignes de front stabilisées tandis que les Alliés s'éloignèrent rapidement en direction du nord-est de leurs dépôts.

A l'automne 1918, la situation militaire changea drastiquement avec la reprise de la guerre de mouvement et l'inversion du rapport de force entre Alliés et Allemands. De vastes territoires bombardés furent reconquis en direction des frontières du nord-est. Cette bascule entraîna avec elle celle de l'organisation et des objectifs de la récupération et du désobusage militaires pour coller avec ce mouvement, à la nouvelle répartition des contingents mais aussi aux futurs découpages de l'administration civile. Les projectiles fonctionnels récupérés furent utilisés pour limiter au maximum les approvisionnements par les dépôts des arrières qui s'éloignèrent. Une réorganisation de la récupération s'imposa dès l'armistice avec l'arrêt des combats et la pleine disponibilité des personnels militaires encore mobilisés.

Cette récupération des premiers instants de la sortie de guerre se montra dysfonctionnelle et lente, car confrontée à des difficultés endémiques d'ordre comportementales (indisciplines des soldats démotivés par les missions militaires et en attente de la démobilisation), organisationnelles (imbrication des secteurs de récupération français et alliés, etc.) et structurelles. A cela s'ajoutèrent des causes externes en lien avec l'administration mise en place à la sortie de la guerre. Cette administration transitoire entre temps de guerre et temps de paix s'avéra être d'une grande complexité avec pour conséquences (i) l'atomisation des responsabilités et la dispersion des pouvoirs décisionnels alors que les arbitrages s'imposèrent plus que jamais face à l'ampleur des tâches de la reconstruction et (ii) l'absence de coordination entre les instances centrales et régionales, les autorités civiles comme militaires. Les acteurs de la récupération et plus généralement ceux des reconstructions avaient aussi à répondre et à satisfaire des demandes provenant de nombreuses instances civiles comme militaires: le Ministère des Régions Libérées pour la remise en état des terres, des maisons, des localités, le Ministère de la Reconstitution Industrielle pour la réouverture des usines et la récupération de matières premières, enfin à l'autorité militaire, le Ministère de la Guerre, qui, par la voie de différents services, demanda à rentrer en possession le plus rapidement possible des munitions éparpillées ou entreposées sur le terrain.

Cette récupération fut refondue en 1919 afin de pouvoir hâter la remise en état des sols tant que le personnel encore sous les drapeaux, français comme allié, ainsi que les Prisonniers de Guerre étaient encore disponibles. La nouvelle organisation fut encadrée par la note du 5 février 1919 intitulée « *Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées* » qui fixa les nouvelles modalités de fonctionnement et d'organisation de la récupération. Fut mis en place le « Service de la Récupération et de la Reconstitution » doté de deux subdivisons, l'une civile, l'autre militaire, appuyées par un nouveau service transverse aux Ministères de la Guerre et celui des Régions Libérées, placé sous les ordres du commandement des Régions militaires concernées : le Service du désobusage. Puis fut votée le 17 avril 1919 la « Loi sur la réparation des dommages causés par les faits de la guerre » dont l'Article 60 engageait la responsabilité de l'Etat en terme d'enlèvement des projectiles non explosés et de protection des populations au contact des engins et matières explosibles (prolongeant les clauses de celle du 7 avril 1917 sur la réparation des dommages de guerre).

La géographie des REG et surplus de guerre fut alors à nouveaux modifiée.

Les personnels affairés à la récupération procédaient d'abord à l'identification des engins de guerre découverts, en distinguant ceux transportables**,** de ceux jugés trop dangereux ou « douteux » pour être manipulés et transportés. Des compétences pointues en matière de munitions étaient requises pour cette tâche. Ces dernières étaient détruites sur place par pétardement (*Open Detonation* (OD), *Blown-In-Place* (BIP)), c'est-à-dire par la transmission par « sympathie » d'une détonation initiale générée par une charge explosive volontairement apposée sur le projectile et actionnée à distance par les artificiers. Les poudres nitrocellulosiques étaient détruites par leur brûlage à l'air libre (*Open Burning* (OB)) dans des sillons (tranchées de brûlage) spécialement creusés. Les engins transportables étaient dirigés vers des centres de triage et de là étaient soit réservés pour leur élimination, soit orientés vers des centres réfection ou des centres de rassemblement. Des dépôts et des munitions dispersées furent rassemblés dans ces dépôts spécifiques aux engins de son propre camp ou aux munitions ex-allemandes, si possible positionnés loin des lieux habités. D'abord initialement détruites dans l'urgence en 1918, les munitions ex-allemandes récupérées furent rassemblées et réservées après la signature du Traité de Versailles (28 avril 1919), les forces allemandes n'étant alors plus en mesure de remettre la main dessus.

Ces dépôts, contrairement à ceux éparpillés, pouvaient être gardés. Des regroupements massifs de munitions conduisirent dans certains secteurs des anciennes positions arrières (possédant des voies de communication denses et en bon état) à des accumulations de tonnages considérables de restes et épaves de guerre, comme dans le secteur de Spincourt en Meuse, pour les munitions à chargement chimique. Ces vastes dépôts en plein champ étaient source d'angoisse et de préoccupations parmi les populations qui devaient les côtoyer à leur insu, surtout s'ils renfermaient ou étaient suspectés de l'être, des engins chimiques.

Dans ces accumulations, le moindre incident pouvait se transformer en accident catastrophique avec des incendies et explosions semant autour d'eux effroi, stupeur et causant des dégâts aux habitations.

Des centres de destruction furent exploités par l'Armée pour détruire en masse les munitions obsolètes, en excès et hors d'usage. Les engins étaient pétardés en tas (fourneaux) dans des entonnoirs de destruction, larges et profonds, qui, organisés en chapelets ou en rangées parallèles formèrent des terrains d'explosion. Les artificiers imaginèrent des designs particuliers de fourneaux d'éclatement pour optimiser leur fonctionnement. Bien que renfermant très peu d'explosifs et ne pouvant donc pas détoner convenablement, des munitions à chargement chimiques furent aussi pétardées selon des *modus operandi* bien particuliers. Lors de ces opérations, des munitions, intègres mais déformées ou fracturées par les détonations, étaient projetées à plusieurs centaines de mètres du point de détonation, par-dessus les lèvres des entonnoirs d'éclatement.

Des plans et programmes de travail furent élaborés conjointement par les autorités civiles et militaires, considérant les consignes passées aux récupérateurs militaires afin de prioriser par ordre d'urgence d'une part les terrains à libérer et d'autre part les matériels à récupérer ou à détruire. Les personnels de la récupération militaire et civile furent incités à la tâche par l'octroi de primes indexées sur la nature des matériels récupérés.

Les travaux de récupération des REG et de destruction des munitions et matériels de guerre jugés dangereux d'une part et ceux des reconstructions agricoles, industrielles et domestiques d'autre part étaient intimement liés dès septembre 1914 et plus encore dans l'immédiate sortie de guerre, car les premiers étaient incontournables pour garantir en toute sécurité la faisabilité des seconds. Récupérer, identifier, trier, enlever et éventuellement détruire les munitions indésirables relevaient de compétences militaires et des missions de l'Artillerie et du Génie alors que localiser les engins de guerre abandonnés sur le terrain, les signaler et relever les ruines, remettre les terrains agricoles en état rentraient dans les missions des autorités civiles. Militaires comme civils partageaient une préoccupation commune, orientant leurs actions vers une seule et même finalité : reconstruire au plus vite, protéger les populations de déplacés et sinistrés (conformément à la Loi du 17 avril 1917), aspirant à une nouvelle normalité en temps de paix en débarrassant les sols de France et de Belgique des encombrantes, anxiogènes et dangereuses reliques pyrotechniques héritées d'un temps de guerre révolu.

L'organisation et les modalités de fonctionnement des instances en charge de la récupération et du désobusage furent le reflet de cette singulière imbrication de missions civiles et militaires. Les services en charge de la récupération et du désobusage étaient des structures transverses à tous les services, offices, en charge de la reconstruction et aussi mixtes, alliant des intervenants, dirigeants, consultants et exécutants, aussi bien militaires que civils. Dans le contexte particulièrement obscur de la transition complexe d'une administration militaire du temps de guerre vers celle, civile, du temps de paix, gérée tant bien que mal par des organismes et ministères temporaires, parfois éphémères, la démultiplication des intervenants et des donneurs d'ordre au sein de la récupération, possédant des champs d'intervention et de responsabilités aux contours flous, constitua un frein à la bonne marche des opérations sur le terrain. Le talon d'Achille de la récupération restait comme durant la guerre celle de la disponibilité d'une main d'œuvre qualifiée. Le *Salvage* de l'AEF fut rapidement dissout avec le retour aux USA des troupes américaines dès 1919, ayant au préalable démoli de grandes quantités de munitions notamment ex-allemandes sur les secteurs de leurs deux armées. Le *Salvage* britannique démobilisa aussi progressivement passant le flambeau au Service de la récupération en secteur britannique. Les travaux de récupération et de désobusage en Belgique furent menés quant à eux par l'Armée française. Enfin, l'année 1919 fut aussi celle des premières tentatives du Ministère de la Guerre et du Ministère des Régions Libérées de déléguer certaines opérations particulières, comme la liquidation de vastes dépôts de rassemblement, à des entreprises privées par voie contractuelle, en Meuse et en Haute-Alsace, des opérations dangereuses, d'échelle industrielle et visant des milliers de tonnes d'engins, qui furent suspendue un temps car ne répondant pas aux garanties de sécurité. Le cadre administratif ordinaire règlementant la sécurité interne et externe des installations de désobusage était lui aussi inadapté à ces opérations inédites, urgentes, temporaires et « extraordinaires ».

Fin 1919, force fut de constater que cette récupération dans son format d'alors était sous dimensionnée en moyens humains et matériels au regard de la tâche à accomplir et des tonnages considérables de REG de toute nature abandonnés sur les sols de France et de Belgique, de surcroit dans un contexte d'accélération de la démobilisation des troupes françaises et alliées et du renvoi des PG. Le débarrassage des anciens champs de bataille et de leurs abords des REG restait superficiel et parcellaire malgré les tonnages, inconnus, mais vraisemblablement considérables d'engins de guerre récupérés et/ou détruits.

Un nouveau changement s'opéra alors à la bascule 1919-1920 en ce qui concerne (i) les modalités de fonctionnement de la récupération et du désobusage sur et aux abords des anciens champs de bataille, mais aussi (ii) la finalité des opérations de récupération et de destruction des munitions anciennes. Ces deux points font l'objet de la section suivante du présent manuscrit.

Section 8h
1920-1941, tirer profit des Restes Explosifs de Guerre. L'essor et le déclin du désobusage industriel et commercial des champs de bataille

1. Introduction de la Section 8h

Cette section du manuscrit s'attache dans un premier temps à identifier et décrire les causes et origines du tournant de l'année 1920 en ce qui concerne l'organisation mais aussi la finalité des récupérations et du désobusage au droit et aux abords des anciennes zones du front et de stationnement des armées, puis dans un second temps à analyser les modalités du fonctionnement mais aussi du dysfonctionnement de la récupération et du désobusage mis en place par l'Etat dans les années 20, avec le recours aux leviers contractuels. A partir de 1920, la contractualisation des opérations de désobusage et de récupération par l'Etat, se traduisit, contrairement aux années passées, par une importante production de rapports, compte-rendu et autres notes destinées à tracer l'exécution des contrats publics, versés aux archives militaires. Ces documents administratifs ne donnent qu'un éclairage partiel, relatif et situé au niveau du producteur des archives sur la réalité des conditions opérationnelles et du déroulement des opérations sur le terrain. Les archives, relatant le point de vue des exécutants indépendamment des relations contractuelles les liants à l'Etat, sont manquantes.

Un autre changement s'opéra à compter de 1930, après quoi, le désobusage industriel et commercial déclina pour s'achever en 1941. Cette recherche étudie, analyse et décrit aussi le désobusage des années 30 et le processus de son déclin jusqu'au point final durant la Seconde Guerre mondiale.

2. Le tournant de 1920

Fin 1919, les anciens champs de bataille et leurs abords étaient encore constellés de Restes Explosifs de Guerre tandis que les reconstructions se poursuivaient, la récupération et le désobusage militaire de la période 1918-1919 ayant été superficielle et partielle, les moyens humains et matériels des détachements de la récupération ayant été nettement sous-dimensionnés par rapport à l'ampleur de la tâche à accomplir. A l'approche de l'année 1920, la situation changea à nouveau sur le plan militaire, affectant directement les conditions d'organisation de la récupération et du désobusage. La finalité même de la récupération et du désobusage évolua elle aussi.

2.1. DEMOBILISATION ET L'AMENUISEMENT DE LA MAIN D'ŒUVRE MILITAIRE

La main d'œuvre militaire disponible pour ces missions déclina. La démobilisation des hommes en armes au sein de l'armée française se termina progressivement jusqu'en 1920 alors que les Américains de l'AEF, avec leur *Salvage*, quittèrent le territoire national en à peine six mois. Les Britanniques démobilisèrent aussi très rapidement en 1919 et 1920 tandis que l'entrée en vigueur en janvier 1920 du Traité de Versailles autorisait le retour chez eux, par vagues successives, des PG allemands.

L'Etat français se retrouva donc rapidement non seulement seul face à la problématique du nettoyage des anciens champs de bataille, mais aussi amputé de la main d'œuvre militaire qui exécutait cette mission jusqu'alors. La solution s'imposa, déjà esquissée en 1919 avec Clere & Schwander alors mandaté par l'Etat pour des opérations particulières visant de grands dépôts de munitions : la délégation de la tâche par la passation de contrats avec des prestataires privés.

2.2. DES DECHETS DE GUERRE AUX GISEMENTS DE MATIERES PREMIERES SECONDAIRES.

« Turning Swords into Ploughshares[1181] »

Selon la loi du 15 juillet 1975, est considéré comme constituant un déchet : « *Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon* » (Article L.541-1-1 du Code de l'environnement). Avant 1920, les munitions anciennes, les Restes Explosifs de Guerre, étaient des « déchets » vouées à l'abandon, par enfouissement, ennoyage ou encore destruction par pétardement, période 1918-1920 durant laquelle *« Des millions de francs disparurent ainsi en fumée et en débris[1182] ».* Vers 1920, le statut de ces matériels et engins de guerre changea littéralement, passant de déchets de guerre à celui de « gisement », source de matières premières secondaires valorisables, un « *Iron Harvest* » hérité de la guerre potentiellement profitable. Le four à réverbère Martin-Siemens fut rendu vers 1920 totalement opérationnel à l'échelle industrielle. Il révolutionna la métallurgie car il permit de refondre la ferraille de récupération (dont étaient constituées les munitions) pour en faire des aciers performants. La chaleur réverbérée dans ce type de four permettait d'affiner la fonte en fusion, autorisant l'élaboration d'acier de bonne qualité. Les métaux ferreux et non ferreux (cuivre, laiton, zinc, aluminium, plomb, etc.) qui avaient été délaissés sur les anciens champs de bataille et dans les dépôts, jusqu'alors inutiles, purent être valorisés et recyclés. Les ferrailles de guerre se transformèrent en « riblons », des déchets de ferraille utilisés dans la fabrication de la fonte ou de l'acier dans les fours Martin.

A compter de cette date, les munitions furent recherchées, récupérées puis rebutées non seulement pour annihiler leurs fonctionnalités militaires et leur dangerosité dans une perspective sécuritaire mais aussi pour récupérer, recycler et réinjecter dans les circuits industriels et économiques, à des fins profitables pour l'Etat comme pour les entreprises privées opératrices, des matières premières et matériaux constitutifs, si couteux à produire en temps de guerre. Il s'agissait aussi de matières dont la reconstruction avait cruellement besoin. Particulièrement concernées étaient les Régions militaires où les plus grandes quantités de REG avaient été rassemblées après-guerre, à savoir les 1er, 2e et 6e Régions.

[1181] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *FN Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, op. cit*, p.32.

[1182] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Figaro*, *Le Désarmement du sol,* samedi 31 mai 1921.

2.3. LE RECOURS GENERALISE PAR L'ETAT AU DESOBUSAGE EXTERNALISE PAR VOIE CONTRACTUELLE

2.3.1 Situation dans les 1er, 2e, 6e Régions militaires

Recours à deux types de marchés

Dans chacune des 1er, 2e, 6e Régions militaires, où les duels d'artillerie furent particulièrement intenses et violents et où, par conséquent, le désobusage porta sur des tonnages de projectiles très importants, les moyens humains, matériels apportés par les services de l'Etat, mais aussi les moyens financiers alloués pour cela, restèrent insuffisants durant les années 1918 et 1919 pour répondre aux objectifs de la reconstruction.

Ainsi « *En vue de réduire les charges résultant pour l'Etat, du fonctionnement du désobusage, le recours à des entreprises, ne tarda pas à être envisagé par le Service de l'Artillerie, en ce qui concerne du moins certaines opérations déterminées*[1183] ». L'Etat, via le Ministère de la Guerre et celui des Régions Libérées firent en effet appel, comme en 1919 pour la liquidation des dépôts de la Hardt et de Spincourt, à des entreprises privées par adjudication pour assurer, dans la continuité des opérations conduites par les militaires, la récupération et le désobusage. Les missions assignées à ces entités étaient pour l'ensemble des régions concernées la recherche générale et la destruction de tous les engins découverts et pour certaines zones bien spécifiques (i) le nettoyage par piochage de la « zone rouge », (ii) le nettoyage par fouilles profondes des anciens champs d'explosion[1184]. La destruction des munitions ne porta pas seulement sur les engins dangereux découverts au cours des travaux des entreprises adjudicataires, mais aussi sur ceux qui étaient découverts, puis signalés par les municipalités, l'administration des Eaux & Forets ou le Service de l'Artillerie. Les Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) de chacune des Régions militaires prirent alors en charge la consultation d'entreprises présentant des garanties financières et techniques suffisantes pour les missions demandées et le contrôle, plus au moins approfondi, de deux types de marchés. La contractualisation s'opéra dans les deux cas de figure avec le Ministère des Finances via le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stock.

Les premiers contrats étaient civils et dénommés « des Régions Libérées ». Ils visaient la récupération des ferrailles « inertes » c'est-à-dire dépourvues de matières explosibles ; ces opérations n'exigeaient pas de compétences techniques particulières en matière de munitions et d'explosifs ; il s'agissait dans l'absolu d'une récupération banale de vieux métaux. Les adjudicataires privés étaient alors mandatés pour ramasser la ferraille, voire effectuer des fouilles pour rechercher métaux enfouis (en procédant par le piochage manuel à une profondeur maximale de 40 cm). Ces contrats furent soumis pour approbation à la sous-direction des Ponts & Chaussées dépendant à cet égard de l'Administration des Régions Libérées. Cette direction fut l'organe de contrôle de l'exécution des marchés. Les militaires intervinrent dans le seul but de s'assurer qu'aucun matériel explosible « non inerte » n'avait été illicitement récupéré.

[1183] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. 1er Région. Place de Douai. Rapport particulier n° 2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage. p. 4.

[1184] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 8 N 120. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'Administration de l'Armée. 2e, 6e, 7e et 20e Régions. Places diverses. Service de l'Arrière. Désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport Particulier. Fait par M. Macherat. 10 novembre 1930.

Les seconds étaient des contrats militaires du « Temps de Guerre », avec comme donneur d'ordre le Ministère de la Guerre, et visaient la récupération des engins de guerre potentiellement encore actifs, leur neutralisation, pour en tirer des métaux (acier, fonte, fer, cuivre, zinc et laiton pour l'essentiel). Ces opérations risquées faisaient appel à des métiers spécialisés comme celui d'artificier et exigeaient des compétences techniques pointues dans le domaine des munitions. Les cahiers de charges du « Temps de Guerre » imposés aux entreprises étaient produits par la Direction de l'Artillerie (DA), qui assurait aussi dans chacune des Régions militaires concernées, le contrôle du respect des clauses techniques dans l'exécution des contrats. La DA délégua ces missions à chacune des Régions militaires concernées via les Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR). Le premier marché militaire (marché « du Temps de Guerre ») fut passé en gré à gré, sans mise en concurrence, le 19 mai 1920 par le Général Commandant l'Artillerie de la 1re Région, opérant pour le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks). Il s'agissait du contrat « Pickett », passé avec l'entreprise de droit français (mais avec une direction britannique) F.N. Pickett & Fils (dont le siège était à Wimereux, département du Pas-de-Calais) pour la démolition de 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes entreposées dans la forêt de Trélon (département du Nord) (cf. Section 10h du présent manuscrit).

La procédure de gré à gré, fut vraisemblablement invoquée, comme pour Clere & Schwander en 1919, pour les exceptions prévues par l'Article 18 du Décret du 18 novembre 1882 sur les marchés publics aux paragraphes 4 (*objets n'ayant qu'un possesseur unique*), 7 (*travaux que des nécessités de sécurité publique empêchent de faire exécuter par voie d'adjudication*) et 10 (*fournitures transports ou travaux qui, dans les cas d'urgence évidente amenées par des circonstances imprévues, ne peuvent pas subir les délais des adjudications*)[1185].

Les marchés militaires « du Temps de Guerre » visaient la récupération et la destruction des munitions découvertes au droits et aux abords des anciens champs de bataille, (ii) les munitions des centres de rassemblement, suite au regroupement opérées par le Service du désobusage, et (iii) les dépôts de munitions abandonnés au terme de la guerre qui seraient encore découverts. La note intitulée « *au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille* » du Ministère de la Guerre du 22 octobre 1928 précisait « *Il est à noter également, comme suite aux renseignements verbaux donnés le 22 octobre 1928, que les marchés actuels (Artillerie) comprennent non seulement la destruction des munitions regroupées par le Service de désobusage mais aussi le nettoyage des anciens dépôts de munitions lorsqu'il en est encore découvert*[1186] ».

D'autres contrats pour des opérations spéciales, locales, comme la dénaturation des munitions conventionnelles et/ou chimiques, obsolètes et/ou en surplus stockées dans de vastes dépôts à l'écart des anciennes lignes de front, furent aussi conclus entre le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks et des concessionnaires privés. Cette liquidation des surplus militaires et industriels fait l'objet d'une section spécifique de ce manuscrit (cf. Section 10h du présent manuscrit). Elle concerna, loin des anciens champs de bataille, sur leurs territoires respectifs, toutes les parties belligérantes ayant croisé le fer sur le front occidental. Ces contrats visant des opérations spéciales s'assimilaient à des contrats « du Temps de Guerre » compte tenu de la nature des matériels « non inertes » à dénaturer.

[1185] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Année 1930. 1er Région. Place de Douai, *op. cit.* p. 11.

[1186] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 92. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, 2e Bureau, Matériel. Monsieur le Contrôleur de l'administration de l'Armée Rebouet. 12, rue d'Ouessant, Paris (15e). Note au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille. Paris, le 22 octobre 1928. Signé : Rebouet.

Cession des métaux propriété d'Etat contre redevance

Les REG et épaves de guerre abandonnés étaient initialement propriété d'Etat. Les adjudicataires des deux types de marché de récupération se virent attribués la propriété (cession) des métaux selon les prix fixés dans les cahiers des charges par l'Artillerie et le Ministère des Régions Libérées en contrepartie du versement au Trésor d'une redevance fixée à la tonne et selon la nature des métaux récupérés (acier, fonte aciérée des corps des munitions, cuivre, zinc, laiton des ceintures, douilles et fusées, plomb des balles de *Shrapnels*, etc.). « *L'une et l'autre de ces deux catégories de contrats comprenait, moyennant redevances, appropriation par le titulaire des marchés, des débris de munitions inertes ; les redevances à verser au Trésor représentaient l'intérêt financier principal des conventions [ndlr : pour l'Etat*][1187] ». Les marchés des « Régions Libérées » étaient forfaitaires tandis que ceux « du Temps de Guerre » étaient sur quantités et séries de prix (indexés sur la nature des métaux récupérés). Ces métaux étaient ensuite écoulés dans le circuit économique en étant revendus par les concessionnaires à des sidérurgistes, à des prix dépendants des cours des vieux métaux. Ce dispositif était donc source de recettes à la fois pour l'Etat et à la fois pour les adjudicataires des marchés de récupération, civils, comme militaires.

2.3.2 Situation dans les 7e et 20e Région militaires

Dans les autres régions concernées par les combats de la Première Guerre mondiale, à savoir les 7e et 20e Région militaires, les combats intenses d'artillerie n'intéressèrent que des zones d'étendue relativement restreinte, qui plus est se montrèrent difficiles d'accès (anciens champs de bataille situés en altitude dans le massif des Vosges par exemple). La DA ne jugea pas nécessaire dans ces secteurs de recourir systématiquement à des contrats avec des entreprises privées et le désobusage, fut pris en charge directement par les PAR, se limitant à l'enlèvement et/ou la destruction des engins de guerre qui auraient été signalés par les autorités communales et l'administration des Eaux & Forêts.

3. Ferrailleurs versus désobuseurs. Croiser le fer pour le profit (1920-1929)

3.1. FAILLES ET FAIBLESSES D'UN DISPOSITIF CONTRACTUEL

Les clauses des cahiers des charges et les marchés souffrirent de faiblesses et d'imprécisions se traduisant dans les faits par des difficultés de contrôle et de gouvernance par les instances militaires en charge de la bonne exécution des contrats. La gestion du désobusage par voies contractuelles comportait un ensemble de procédures auxquelles les services de l'Artillerie n'étaient pas nécessairement préparés. L'armée était vraisemblablement mieux préparée et organisée pour mobiliser et faire la guerre, selon les instructions des écoles militaires, qu'orchestrer dans le cadre général de la démobilisation, le désarmement contractuel des sols. Cette démilitarisation des sols et des anciens champs de bataille à grande échelle, visant des tonnages et surfaces considérables, était, comme pour l'usage des armes durant la guerre, une nouveauté dans la sortie de guerre. Des failles, faiblesses dans le dispositif contractuel mis en place étaient inévitables dans ce contexte. Elles sont décrites dans ce qui suit.

[1187] Service Historique de la Défense, site de Vincenne. Année 1930. 1er Région. Place de Douai, *op. cit*. p.7.

3.1.1 Absence de contrôle et de traçabilité des origines des marchandises de récupération

Dans les 1er, 2e et 6e Région militaires, les deux types de marchés visaient une même matière rémunératrice, les métaux de récupération, quelles que soient leurs origines, qu'ils proviennent (i) d'engins de guerre intègres et encore actifs, ayant été volontairement neutralisés puis démontés pour en soutirer des fragments inertes (dénommés « caffûts »), ou (ii) d'éclats et matériels inertes récupérés tels quels sur les champs de bataille ou des terrains d'explosion. A l'exception des fusées d'artillerie et des ceintures, rien, à la pesée ne permettait de différencier les deux origines. Entre la découverte des métaux sur le terrain et le point de pesée, les contrôles des mandataires par les mandants étaient extrêmement problématiques à organiser voire impossibles. L'Artillerie contrôlait les chantiers « militaires » mais aussi « civils » de récupération des matières inertes, pour s'assurer, pour ces derniers, qu'ils ne renfermaient aucun projectile explosible issus de récupérations illicites. A contrario, les Ponts & Chaussées (administration des Travaux publics) n'avaient aucun pouvoir de contrôle sur les entrepreneurs du Ministère de la Guerre, rien n'ayant été prévu dans les cahiers des charges en ce sens car les prix des marchés étaient forfaitaires. Dans la pratique, les contrôles des clauses contractuelles étaient quasiment impossibles à réaliser.

3.1.2 Une coexistence de deux redevances inégales

Plus problématiques était la coexistence pour les deux types de marchés en vigueur de redevances dues à l'Etat, versées à la tonne de matériaux récupérés, significativement inégales.

Celles dues au Trésor dans le cadre des marchés militaires étaient moindres que celles des marchés civils. Les profits que pouvaient dégager ces entreprises par tonne de métaux récupérés étaient donc bien supérieurs dans le cadre des marchés militaires (sur quantités et séries de prix) que dans celui des marchés civils (forfaitaires).

3.1.3 Infractions et irrégularités de l'Artillerie dans l'exécution des contrats

Les enquêtes menées par le Ministère de la Guerre en 1930 révélèrent ainsi que le commandement de l'Artillerie de la 1er Région militaire en charge du contrôle et de l'exécution des contrats commit des infractions et irrégularités, notamment aux prescriptions formelles de l'Instruction du 21 novembre 1921 sur les marchés de la Guerre (en demandant des garanties financières à des entreprises par des « cautions solidaires » lorsqu'elles n'étaient pas nécessaires et éludant de le faire là où elles étaient pertinentes).

3.1.4 Absence d'organes de police et de sanctions

L'organisation du désobusage ne possédaient par ailleurs aucun organe ayant autorité pour faire la police et s'assurer de l'application de l'Article 60 de la Loi du 17 avril 1919 (en vue de garantir la sécurité publique). La Direction de l'Artillerie, que sa compétence technique désigna pour l'exécution de certaines opérations particulières (enlèvement de projectiles et matériaux dangereux et leur destruction), ne sut être que le préposé de l'autorité qualifiée pour agir pleinement au nom de l'Etat pour garantir la sécurité publique (avis du Conseil d'Etat du 9 janvier 1927). Aucune clause n'avait été prévue pour des poursuites ou sanctions en cas d'entorses ou d'inapplication des exigences contractuelles (comme pour l'exécution du marché 58 de W. Gilbert comme cela sera exposé dans la suite de ce développement).

3.1.5 Le retour du pouvoir décisionnel des autorités civiles et des droits des propriétaires fonciers

Par ailleurs, les administrations « habituelles » du temps de paix retrouvèrent dans cette sortie de guerre leur légitimité puis leur autonomie. Les Maires, Préfets pouvaient à nouveau faire valoir leur droit de véto comme par exemple à des projets d'édification d'usines et d'ateliers de démolition de munitions, et les propriétaires fonciers, avec la restauration de la propriété privée sur des terrains juqu'alors réquisitionnés ou occupés par les armées, s'opposer (après dé réquisition) à ce que les entrepreneurs du désobusage pénétrèrent dans leur propriété. L'Artillerie devait faire preuve de persuasion pour faire en sorte que ces récupérateurs puissent pénétrer sur les parcelles privées.

L'accès aux terrains était laissé au bon vouloir des propriétaires. Pas même l'autorité préfectorale ne pouvait l'imposer faute d'informations fiables sur la présence réelle d'engins dangereux et justifier des destructions d'office par impérieuse nécessité. Le cas du Bois de la Gruerie, en Argonne (6e Région militaire, département de la Marne), fourni un exemple typique des difficultés que purent ainsi rencontrer les entrepreneurs et les services de l'Artillerie pour effectuer le désobusage sur des terrains privés. Cette opposition des propriétaires ne manquait pas toujours d'un certain fondement dans les faits car « *souvent ce personnel profite de son séjour dans les bois pour se livrer au braconnage du gibier ; plus souvent encore, les équipes procèdent à la récupération en causant des dégâts inutiles que ne compensent pas toujours les indemnités obtenues non sans difficultés par le propriétaire*[1188] ».

3.1.6 D'incessants ajustements par avenants

Ces marchés imparfaits furent bien souvent sans cesse révisés par une multitudes d'avenants, notamment pour (i) ajuster les tarifs forfaitaires et les prix aux courts fluctuants du marché des vieux métaux, pour (ii) renforcer certaines exigences sécuritaires ou pour sécuriser les intérêts de l'Etat. L'éventualité du marché unique permit d'éluder notamment l'exécution d'ordres ministériels prévoyant en 1926 un nouvel appel d'offre avec mise en concurrence à la date d'échéance des contrats existants. C'est ainsi que les contrats de deux entrepreneurs opérant sur la 1er Région militaire, L. Berge et W. Gilbert, furent mécaniquement prolongés par avenant jusqu'à la mise en place du nouveau régime par marché unique en 1929.

[1188] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'administration de l'Armée. Service de l'Artillerie. Désobusage (fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport particulier fait par M. Macherat. 2e, 6e, 7e et 20e Régions, places diverses. 10 novembre 1930. p. 6.

3.2. FRAUDES, PRATIQUES ILLICITES ET ACCIDENTOGENES : L'EXECUTION CHAOTIQUE DU DESOBUSAGE CONTRACTUEL

3.2.1 Fraudes d'imputation d'un marché sur l'autre

L'existence conjointe de deux marchés visant une même matière mais dont la provenance, était impossible à tracer et à contrôler, ouvrant droit à deux tarifications de redevances à verser à l'Etat par les entreprises adjudicatrices mais inégales selon les marchés, l'absence de contrôle et de dispositif de sanction par l'organe donneur d'ordre ouvrirent bien grande la porte aux pratiques de récupération illicites et aux fraudes pénalisant le Trésor. « *l'imputation frauduleuse […] se trouva tout particulièrement attrayante, du fait que les taux de redevances fixés par les cahiers des charges militaires étaient très inférieurs aux taux stipulés par les contrats civils* [1189]». C'est ainsi que des entreprises sous contrat militaire cherchèrent des métaux sur des matériaux inertes et les comptabilisèrent sur leur(s) marché(s) militaire(s) visant la récupération de ces mêmes métaux mais sur des engins actifs. Elles cherchèrent aussi à tirer un maximum de profit des matériels découverts sur le terrain qui possédaient une forte plus-value commerciale sans présenter de dangers lors de leur acquisition, délaissant le reste, c'est-à-dire les REG encore en puissance d'explosion, dont il fallait se débarrasser. Le compte rendu adressé au Commandant de l'Artillerie du 8 avril 1926 par le chef du secteur d'Arras est à cet égard édifiant. Il fut établi après l'obtention par la Société des Tréfileries et Laminoirs du Havre d'un marché forfaitaire civil se juxtaposant dans le Pas-de-Calais aux divers marchés militaires qu'exploitait Léon Berge. Le compte rendu indique notamment comment seules les parties des munitions les plus profitables étaient récupérées, abandonnant sur place celles plus risquées à neutraliser « *Les douilles encore attenantes après les obus sont enlevées, les obus restent sur le terrain ou même sont ré enfouis*[1190] ».

Les entreprises de désobusage (contrat militaire) et de récupération (contrat civil) s'accordèrent aussi parfois dans ces conditions pour exploiter les failles et faiblesses du dispositif pour maximiser leurs gains. Ce fut ainsi le cas dans la 1er Région militaire avec les entreprises Berge et Gilbert. Léon Berge était un entrepreneur d'Arras (département du Pas-de-Calais) d'origine russe (et naturalisé français). Le rôle de son entreprise Berge, représentant la Société des Tréfileries et Laminoirs du Havre (dont le siège était à Saint-Nicolas Blangy à proximité d'Arras), devint prépondérant dans le désobusage principalement dans la 1er Région dans l'entre-deux-guerres. Il fut rendu titulaire de trois marchés militaires

- Le marché 59 approuvé le 14 janvier 1925 avait pour objet le nettoyage et le nivellement des terrains d'explosion ayant été exploités par le service du désobusage à Neuville-Saint-Vaast (département du Pas-de-Calais). Les engins découverts devaient aussi être démolis par l'entrepreneur ;

- Le marché 86 approuvé le 21 juin 1927 transformait en contrat les autorisations accordées à l'entrepreneur, notamment en novembre 1925, en vue de la recherche et de la démolition des cartouches pour armes portatives abandonnées par les armées sur le territoire de la 1er Région.

- Le marché 85 approuvé le 30 juin 1927 vint se substituer aux divers marchés antérieurs en comprenant aussi par ailleurs des opérations de destruction ne faisant pas l'objet de ces marchés.

[1189] Service Historique de la Défense, site de Vincenne. Année 1930. 1er Région. Place de Douai, *op. cit*. p. 9.

[1190] *Ibid,* p. 42.

Berge se rendit progressivement « *maître […] à des conditions extrêmement avantageuses, de la partie de la récupération militaire non assurée par le service de l'artillerie, les deux entrepreneurs […] paraissent avoir eu pour objectif de se rendre ou de rester maîtres de la récupération civile pour exercer ainsi, chacun dans un département ou une région déterminée, la récupération intégrale* [1191]». Les deux entrepreneurs en question, Berge et le britannique W. Gilbert s'entendirent pour obtenir l'exclusivité des marchés civils et militaires dans respectivement les départements du Pas-de-Calais et du Nord.

Les deux entrepreneurs procédèrent ainsi aisément, discrètement, à des imputations frauduleuses des métaux récupérées d'un marché civil sur un marché militaire, en s'adonnant dans cette quête du profit facile à des pratiques, irrégulières, souvent irresponsables et sources d'accidents.

Fraudeurs et récupérateurs illicites pouvaient poursuivre leurs agissements en toute impunité sans être inquiétés, faute d'organe de police et de sanctions. Les Ministères en charge du contrôle de l'exécution des marchés (Ministère de la Guerre et Ministère des Régions Libérées) restèrent bienveillants à l'égard des entreprises de récupération, chacun privilégiant la protection de ses propres entrepreneurs.

3.2.2 La recherche du profit au péril de sa vie

Les ferrailles inertes et projectiles présents par milliers de tonnes au droit et au sein des anciens champs de bataille constituèrent donc un gisement de matières secondaires valorisables très attractif et facilement accessible. L'Etat ne pouvait, n'avait pas les moyens de surveiller ces terrains. L'appât du gain que put procurer la récupération de certaines parties des projectiles (ceintures en cuivre, zinc, fusées en laiton, etc.) exerça une attractivité telle sur les « *individus qui sans droits et sans compétences*[1192] » qui se livrèrent à la récupération en procédant à des démontages d'engins « *sans prendre les précautions les plus élémentaires ; les fraudeurs paient souvent de leur vie ces pratiques clandestines répréhensibles et ce qui est plus regrettable encore, les explosions causées par leurs imprudences atteignent parfois des tiers*[1193] ». Ainsi « *Les ceintures en cuivre, récupérées en vertu du marché forfaitaire sont pour une grande partie enlevées d'après les obus, de même que les rondelles et tubes d'artifices*. *Les enquêtes faites sur les accidents survenus jusqu'à ce jour par explosion d'engins de guerre ont permis de constater que la plupart de ces accidents étaient occasionnés par des démontages de munitions faits à l'aide de burins et marteaux*[1194] ». Les tribunes dans la presse locale de l'entre-deux-guerres se firent largement l'écho de ces nombreux accidents provoqués lors de récupérations illicites. Il est vraisemblable que bon nombre de ces récupérateurs, victimes des épaves de guerre, n'étaient pas conscientes des dangers qu'ils encouraient en manipulant ces matériels.

[1191] Service Historique de la Défense, site de Vincenne. Année 1930. 1er Région. Place de Douai, *op. cit*, p. 23.

[1192] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Désobusage (fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport particulier fait par M. Macherat. 2e, 6e, 7e et 20e Régions, places diverses. 10 novembre 1930, *op. cit,.* p.6.

[1193] *Ibid.*

[1194] *Ibid*. p. 43.

3.2.3 Exécution frauduleuse des marchés de désobusage et de récupération : l'exemple du marché W. Gilbert dans la 1er Région militaire.

Les dysfonctionnements dans l'exécution et le contrôle du marché de désobusage, ayant amené fraudes et pratiques illicites, sont particulièrement bien documentés pour le marché n°58 dit « *Gilbert* » ou du « *Nettoyage des dépôts de munitions enfouies*[1195] », suite aux enquêtes approfondies diligentées retrospectivement par la DA en 1930 sur le fonctionnement, et plus encore le dysfonctionnements, du désobusage et de la récupération[1196].

Ce contrat fut passé dans la 1er Région militaire avec le britannique W. Gilbert (ancien employé de l'entreprise F.N. Pickett & Fils (cf. Section 10h)) en janvier 1925[1197]. Ce contrat passé lui aussi en gré à gré, fut motivé par une urgence, issue du signalement, effectué en 1923 par W. Gilbert, de l'existence de dépôts de munitions (cartouches, grenades et obus) abandonnés. W. Gilbert demanda à être autorisé à récupérer ces engins. W. Gilbert devaient, pour honorer une des clauses de son marché 58, déterrer les munitions enfouies, récupérer ce qui était directement récupérable et détruire par pétardement les engins actifs.

Plus d'un an s'écoula entre la passation du marché et l'autorisation accordée à W. Gilbert de commencer les travaux, rendant caduque la clause d'exception par l'urgence (Article 18 du décret du 18 novembre 1882) sur laquelle s'appuyait le choix de la procédure de gré à gré. Le bien-fondé des prétentions de W. Gilbert fut nullement examiné préalablement à la passation du marché.

Ce ne fut qu'après autorisation de commencement des travaux que W. Gilbert consentit à communiquer la liste des dépôts visés par son marché et dont il prétendait connaître l'emplacement. La localisation des dépôts resta très vague, se réduisant aux noms des localités, car en effet W. Gilbert ne connaissait en réalité que huit dépôts sur les 24 visés par le contrat. Ce ne fut que pendant l'exécution de son contrat, menant des enquêtes auprès des habitants des zones concernées, qu'il compléta la liste des dépôts, qui différait toujours de celle adossée au contrat. Les chefs de l'Artillerie des secteurs concernés rapportèrent que W. Gilbert procédait essentiellement à des fouilles et à des sondages dans le sol dans le sens le plus favorable pour son entreprise au détriment des priorités de la sécurité publique. Il privilégiait la collecte des munitions, ou éléments de munitions pour lesquels les frais de récupération allaient être compensés par les recettes issues de la vente de ces métaux, le reste étant abandonné, parfois enfouis, cachés, faisant entorse à leurs engagements contractuels.

C'est ainsi qu'un des sites désignés par W. Gilbert, à Wanquetin (département du Nord), fouillé par ce dernier, ne correspondait pas à un « dépôt » de munitions mais au terrain de destruction de munitions par éclatement exploité par l'Armée britannique avant 1920 (cf. Section 7h du présent manuscrit). Fouiller un terrain d'explosion truffé de ferrailles et d'éclats inertes en tout genre était bien plus facile, bien moins dangereux et bien plus lucratif à moindre frais, que nettoyer un dépôt pouvant contenir des munitions en puissance d'explosion, dangereuses à extraire et onéreuses à détruire. Sur le terrain dit « du Nouveau Monde » à Bailleul, dans le département du Nord, au lieu d'honorer son contrat, l'entreprise W. Gilbert se concentra sur la récupération de cartouches pour armes portatives et de métaux intéressants pour l'entrepreneur ; les travaux cessaient quand les ouvriers rencontraient des engins de peu de valeur commerciale, des obus chimiques, en particulier.

[1195] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Désobusage (fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport particulier fait par M. Macherat. 2e, 6e, 7e et 20e Régions, places diverses. 10 novembre 1930, *op. cit*. p 43.

[1196] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Année 1930. 1er Région. Place de Douai, *op. cit*.

[1197] *Ibid.*

Gilbert ne respecta pas ses engagements contractuels, notamment ses obligations de démolition des munitions découvertes, n'ayant ni les compétences ni un intérêt pécuniaire à procéder ainsi, même s'il était stipulé dans son contrat qu'il pouvait être assisté en cela par des artificiers mis à disposition par l'Artillerie.

Dans la région de Cambrai, l'entreprise W. Gilbert, après avoir fait des recherches à Neuville-Saint-Vaast et Remy, mit à jour 20 obus de 150 mm qui furent alors tout simplement abandonnés en les jetant dans un trou ensuite soigneusement rebouché. L'entreprise aurait ainsi par ses agissements enfouis jusqu'à 50 tonnes de munitions. Prit en flagrant délit, Gilbert ne fut pas sanctionné, le Capitaine Cardon, contrôleur de l'Artillerie, intima de poursuivre les travaux jusqu'à l'enlèvement des engins enfouis, faute de pouvoir sanctionner l'entrepreneur. Les explications adressées en 1926 par W. Gilbert au Ministre de la Guerre restèrent vagues et contradictoires. L'organisation de l'entreprise W. Gilbert était si peu adaptée à la mission qui lui avait été assignée initialement par le contrat 58, qu'après avoir eu recours à des tacherons (sous-entrepreneurs), W. Gilbert céda, en novembre 1925, la plus importante partie de son marché, celle correspondant au Pas-de-Calais, à l'entreprise Berge, elle-même déjà titulaire de marchés militaires, comme le marché 59, celui du nettoyage du vaste terrain d'explosion exploité par l'Artillerie à Neuville-Saint-Vaast (département du Pas-de-Calais), à proximité immédiate de l'actuel mémorial canadien de *Vimy Ridge*. En réalité, le terrain d'explosion avait été remis en exploitation par le Service du désobusage pour détruire des munitions durant l'exécution du contrat 59. La poursuite des destructions par éclatement des engins de guerre par l'Armée sur ce terrain était difficilement conciliable avec le nettoyage du terrain par une société civile. Cet exemple illustre parfaitement comment certaines entreprises privées exploitèrent à leur escient et profit les failles d'un dispositif contractuel étatique, balbutiant, incapable d'excercer un contrôle et de faire valoir un quelconque pouvoir de police en cas de non respect des clauses contractuelles.

3.2.4 Litiges et tensions interentreprises

Parfois encore, des tensions apparurent entre les détenteurs des deux types de marchés, chacune des parties réclamant son dû et des indemnités auprès de l'Armée. Ainsi, dans le Pas-de-Calais, un litige opposa Léon Berge, sous contrat militaire pour l'enlèvement et la destruction d'engins de guerre, et l'entreprise Mazelier, sous contrat civil pour la récupération « *d'épaves inertes* ». Mazelier était chargé du nettoyage de 150 hectares au sein de la « zone rouge », près d'Arras en procédant par piochage, par bandes successives, à hauteur de labour (40 cm)[1198]. C'est à la faveur de ce sondage que les obus furent exhumés, qui auraient en toute logique, selon les clauses contractuelles, dû être remis à Léon Berge. Ce qui ne fut pas fait. Les conséquences potentielles de cette organisation étaient évidentes: des ferrailleurs éliminaient tant bien que mal des engins de guerre en dehors du champ de leurs compétences et engagements contractuels, se soldant dramatiquement par des explosions accidentelles souvent fatales suite aux manipulations inconsidérées du matériel de guerre actif.

[1198] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras, cote 1 W 1653. Correspondances.

3.3. ETAT DES LIEUX EN 1929. GEOGRAPHIE DES SECTEURS DE DESOBUSAGE DES 1ER, 2E ET 6E REGIONS MILITAIRES

A la fin des années 20, le Ministère de la Guerre se rendit à l'évidence que le désobusage et la récupération ne pouvaient plus suivre le cheminement chaotique qui était celui de la décennie écoulée. Le recours à un marché unique fut envisagé. Avant le passage au régime de marché unique en 1929, un état des lieux sur les attributions des contrats fut effectué par la Direction de l'Artillerie dans chacune des régions militaires (1er, 2e et 6e Régions) où avaient été passés des marchés de récupération (des « Régions Libérées ») et de désobusage (du « Temps de Guerre »). Ce découpage est présenté sur la carte de la Figure 175 et les entreprises rendues adjudicataires sur chaque secteur, nommées dans ce qui suit. Il s'agit ici (i) de la situation des différents contrats civils et militaires dans ces trois régions militaires principalement concernées par les opérations de récupération et de désobusage au regard des tonnages de munitions qui y furent déversées durant la guerre, puis (ii) des échéances prévisionnelles contractuelles envisagées à la fin 1928 qui, au regard des archives consultées, semblent coïncider avec celles effectives en 1929. La 2e Région militaire fut notamment découpée en de nombreux sous-secteurs, et notamment le département de l'Aisne, reflétant par-là les importants tonnages et fortes densités (tonnes par hectare) de matériels encore récupérables sur ces territoires.

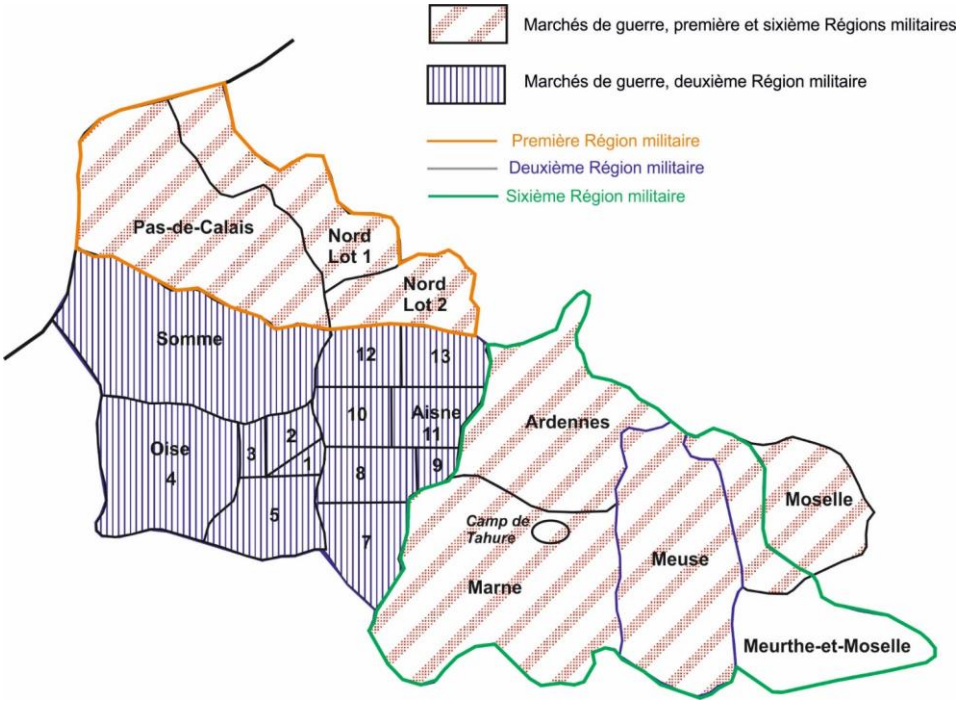


Figure 175 : Découpage des 1er, 2e et 6e Régions militaires pour l'attribution avant 1929 des marchés des « Régions Libérées » et des marchés du « Temps de Guerre »[1199].

[1199] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 92. Note au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille, *op. cit.*

1er Région militaire

Marchés des Régions Libérées

- **Nord** – lot 1, adjudicataire, Mazelier, fin du marché novembre 1928.
- **Nord** – lot 2, adjudicataire, Petit, fin du marché novembre 1928.
- **Pas-de-Calais** - adjudicataire, Mazelier, 7 février 1929. Après cette date le marché des Régions Libérées se poursuivit pour la remise en état des sols, comprenant la récupération de munitions, dans la « zone rouge » autour de Vimy.

Marchés de Guerre

- **Toute la 1er Région** – adjudicataire, Tréfileries et Laminoirs du Havre (Berge), fin du marché, 7 février 1929.

2e Région militaire

Marchés des Régions Libérées

- **Somme** – adjudicataire, Savot Frères & Cie, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Aisne** – lot n°7, adjudicataire, Schoennenberger, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Aisne** – lot n°8, adjudicataire, Mazelier, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Aisne** – lot n°9, adjudicataire, Goury & Martin, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Aisne** – lots n°10, 12, adjudicataire, Mazelier, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Aisne** – lots n°11,13, adjudicataire, Chantraine & Gauttière, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Oise** – lots n°1,2,3, adjudicataire, Meignie & Meyer, fin du marché 31 décembre 1928.
- **Oise** – lots n°4,5, adjudicataire, Mouliet, fin du marché 31 décembre 1928.
- **Oise** – lot n°6, adjudicataire, Géré, fin du marché 31 décembre 1928.

Marchés de Guerre

- **Somme** – adjudicataire, Savot Frères & Cie, fin du marché, 31 décembre 1928.
- **Aisne et Oise** – adjudicataire, Meignie & Meyer, fin du marché 31 décembre 1928.

6e Région militaire

Marchés des Régions Libérées

- **Ardennes** - adjudicataire: Berge, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Meurthe-et-Moselle** - Meignie & Meyer, fin du marché 1er avril 1929.
- **Meurthe-et-Moselle** - Orifier, fin du marché 1er avril 1929.
- **Meuse** - Meignie & Meyer, fin du marché 31 décembre 1929.
- **Camp de Tahure** - Schoennenberger, fin du marché, 31 mars 1929.

Marchés de Guerre

- **Toute la 6e Région** (sauf Tahure (actuel camp de Suippes)) – adjudicataire, Berge, fin du marché, 20 mars 1929.
- **Camp de Tahure** (Camp de Châlons (actuel camp de Suippes)) – adjudicataire, Berge, fin du marché 30 décembre 1929.

Les entreprises Berge, Savot Frères & Cie et Meignie & Meyer se partagèrent en 1929 à elles trois tous les contrats les plus lucratifs à savoir deux du « Temps de Guerre ».

4. 1930. Récupération et désobusage sous marché unique

En 1929, le Ministère de la Guerre jugeât que le désobusage des anciens champs de bataille n'était pas conclu. Il fallait poursuivre les opérations et travaux, seulement s'ils s'avérèrent nécessaires comme le précisa la note *« au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille* » du 22 octobre 1928 « *Des marchés ne seront passés à nouveau par les services de l'Artillerie pour la destruction des munitions récupérées que si l'importance des récupérations restant à effectuer en justifie la nécessité*[1200] ». Si les quantités de REG à rebuter ne justifiaient plus la conclusion de nouveaux marchés, les destructions étaient directement opérées par les artilleurs « *[…], dans le cas contraire la destruction des munitions récupérées serait effectuée par les soins des services de l'Artillerie*[1201] ».

Il importait alors à la Direction de l'Artillerie, qu'à l'expiration des contrats de désobusage alors en vigueur, les destructions de munitions restant à effectuer eut été les plus réduites possibles, car la prorogation ou le renouvellement des marchés s'annoncèrent « aléatoires ». En effet, les exigences des entrepreneurs alors sous contrat se rehaussèrent et ne s'engagèrent qu'à des conditions qui étaient jugées trop onéreuses pour l'Etat. La rehausse des exigences des pétitionnaires est à mettre en relation avec notamment (i) la faiblesse des récupérations possibles (amenuisement du « gisement » des métaux sur les anciens champs de bataille), (i) l'absence de concurrence effective. En 1929, c'était aussi la crise économique mondiale qui pointait et avec elle l'effondrement des cours des métaux dont dépendait la subsistance des entreprises de récupération.

Par ailleurs, dès 1929 les frais énormes résultants de ce travail et de nombreux accidents, amenèrent le Ministère de la Guerre (DA) à confier l'intégralité du désobusage, lorsque l'importance des découvertes et de la récupération le justifiait[1202], à des entreprises privées comme entre 1920 et 1928 mais dès lors plus en gré à gré, un processus défavorable à l'Etat, mais après consultation par un cahier des charges puis mise en concurrence. L'Artillerie dressa dans ce contexte une liste des entreprises susceptibles d'être consultées pour les marchés de récupération et de désobusage à partir de 1930. Il s'agissait d'entreprises ayant fait la preuve antérieurement à cette date, dans l'exécution de divers contrats, de leurs capacités techniques et financières à honorer les marchés:

- **Léon Berge**, Ingénieur, 20 rue d'Anthouard à Verdun (département de la Meuse),
- **E. & H. Meyer & Delaire**, 86 boulevard Magenta, Paris,
- Savot Frères et Cie, entreprise de récupération, rue de Bouzincourt à Albert (département de la Somme).
- **Aigret & Sauron**, entreprise de démolition de munitions, 291, rue du Faubourg Saint-Antoine à Paris,
- **M.M. F.N. Pickett & Fils**, 5 rue basse des Tintelleries à Boulogne-sur-Mer (département du Pas de Calais),
- **Mazelier Frères et Fils**, 74 rue de Cambrai à Lille (département du Nord),
- **Dumont,** 2, rue Jean Bart à Lille (département du Nord),
- **Clere & Schwander**, 109, boulevard Pereire à Paris,
- **Bouxin,** 7, rue Philippe-Thomas à Moulins (département de l'Allier),
- **Petit & Birnau**, Porcaro (département du Morbihan),
- **Société anonyme Géré**, 66, rue Amelot à Paris.

[1200] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 92. Note au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille, *op. cit.*

[1201] *Ibid.*

[1202] *Ibid.*

La dualité contractuelle problématique qui prévalait jusqu'en 1929 prit alors fin, avec la création d'un marché unique englobant toutes les opérations qui faisaient antérieurement l'objet des divers marchés de récupération civils (des « Régions Libérées ») et militaires (du « Temps de Guerre »).

Le Ministère de la Guerre prit la direction des deux services, Récupération et Désobusage, pour les 1er, 2e, 6e et 20e Régions militaires, avec trois entreprises privées adjudicataires (vraisemblablement Léon Berge, Savot Frères & Cie et Meignie & Meyer), échelonnées du département du Nord à celui de la Moselle, où les combats de la Grande Guerre s'étaient déroulés. Les marchés furent conclus pour une durée de deux ans (1930-1932) et leur exécution placée sous la responsabilité une fois de plus des Régions militaires (PAR). Une fois les contrats échus, la conduite par des services de l'Etat fut envisagée.

Des solutions furent aussi recherchées pour pallier aux manquements et « errances » du désobusage par un durcissement des mesures de contrôle et des sanctions coercitives. Le recours à la « Force militaire » par l'intervention de la Gendarmerie fut envisagé pour veiller à la sécurité publique, assurer le maintien de l'ordre et l'exécution des lois (Décret du 20 mai 1903 sur le service de la Gendarmerie)[1203]. La Gendarmerie, par son autorité, pouvait être un facilitateur des opérations dévolues au Service de l'Artillerie par (i) l'obtention des renseignements relatifs à l'emplacement des engins à enlever et/ou démolir (ii) l'exécution des destructions d'office (sans obtenir le consentement des propriétaires des parcelles de terrain concernées) et (iii) l'exécution de sanctions et la répression des actes contraires à la sécurité publique (et notamment la poursuite des fraudeurs et récupérateurs irréguliers).

Ces militaires de la Gendarmerie pouvaient généralement apprécier la situation, le niveau de dangerosité des engins découverts, le degré d'urgence à leur évacuation et/ou destruction et prendre toutes les précautions qui s'imposaient pour sécuriser les lieux et faciliter la venue des personnels du désobusage. Le recours à la Gendarmerie pour signaler aux services compétents du désobusage la présence d'engins dangereux préfigura ce qui sera bien plus tard le mode d'organisation régalien de l'enlèvement de la place publique d'engins de guerre historiques encore en vigueur de nos jours.

Un dispositif fut effectivement mis en place dans les années 30 pour sanctionner les récupérateurs illégaux pris sur les faits accomplis en faisant jouer pouvoir de police (alors du ressort de la Gendarmerie). Les clauses du marché de désobusage de la 2e Région militaire de novembre 1929, révisé par ses deux avenants de janvier 1932 et août 1933 prévoyaient ainsi que « *Les personnes qui, en dehors de l'entreprise ou de ses agents, seraient prises en flagrants délit de récupération, de transport, ou de négoce de matériels et matériaux faisant l'objet du […] marché ou de démontage d'obus, de grenades, ou de cartouches, seraient justiciables des tribunaux*[1204] ».

[1203] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Désobusage (fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport particulier fait par M. Macherat. 2e, 6e, 7e et 20e Régions, places diverses. 10 novembre 1930, *op. cit*.

[1204] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote 22 R 2-497. Coucy.Le Lieutenant-Colonel Beaufeist, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de la Fère aux Maires. La Fère, le 18 décembre 1933.

5. Un désobusage des années 30. De la Der-des-Ders à la Seconde Guerre mondiale

5.1. UN DESOBUSAGE INDUSTRIEL PERCUTE DE PLEIN FOUET PAR LA CRISE ECONOMIQUE MONDIALE.

5.1.1 Un effondrement préjudiciable des cours des métaux de récupération

Le moment de la contractualisation sous le régime des marchés uniques de récupération coïncida aussi autour de 1930 avec celui d'une conjoncture extrêmement défavorable, celle de la crise économique mondiale, la « Grande Dépression » qui eut notamment pour conséquence, un affaissement des cours des métaux et leurs sous-dérivés. Le cours du cuivre, par exemple, passa de 10 Francs à 3 Francs le kilogramme.

Ricome, Directeur de la société Meyer & Delaire, adjudicataire d'un marché de récupération pour les départements de la Marne (à l'exclusion des camps de Tahure et de Châlons), des Ardennes, de la Meurthe-et-Moselle et de la Meuse, fit part de ses difficultés financières au commandement du PAR de Metz, par un courrier datant du 15 janvier 1931, en invoquant notamment l'effondrement des cours des ferrailles et métaux de récupération (baisse de 50% pour la ferrailles et de 40% pour les métaux)[1205].

Les entreprises de récupération et de désobusage subirent alors des pertes considérables qui s'élevèrent à plusieurs dizaines de millions de Francs. Les banques devinrent aussi de plus en plus pressantes et sommèrent certaines entreprises de récupération de rembourser des découverts qu'elles avaient consentis[1206].

5.1.2 L'amenuisement des tonnages récupérables sur les anciens champs de bataille

Parallèlement, on assista au tournant des années 20 à 30 à l'amenuisement du « gisement » des métaux anciens facilement accessibles au droit des anciens champs de bataille après près de 20 ans de désobusage et de récupération. Le nombre et l'étendue des chantiers diminuèrent, et les surfaces qui purent alors encore livrer ces métaux profitables, notamment après sondages par piochage, se réduisirent aussi avec le classement et/ou le reboisement par l'Etat des terrains figurant dans la *zone rouge*. Rechercher les métaux imposait alors de creuser, piocher, ce qui était chronophage, énergivore, engageait des charges et nécessitait du personnel, une opération peu rémunératrice.

L'avancement du désobusage en Meuse entre 1923 et 1935 est à ce titre particulièrement démonstratif (cf. Figure 176). Avant 1929, le désobusage était réalisé par le personnel militaire du Parc Annexe d'Artillerie de Verdun. Les destructions étaient opérées à hauteur d'environ 50 tonnes / mois. Les nouvelles adjudications de 1930 accélérèrent les destructions. Les personnels militaires auraient été en effet appuyées par au moins deux entreprises privées identifiées dans les archives départementales de la Meuse, l'arrageois Berge et Meyer & Delaire.

[1205] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Ferrailles et vieux métaux. E. & H. Meyer et Delaire à Monsieur le Colonel Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz. Verdun, le 15 janvier 1931. Signé : le Directeur, Ricome.

[1206] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Savot Frères & Cie. Albert, le 9 juillet 1931. A Monsieur le Ministre de la Guerre.

Durant un an et demi environ les munitions furent détruites à hauteur environ de 135 tonnes / mois (soit une augmentation d'un facteur 2,5 du rendement des démolitions). Il est vraisemblable que cet accroissement significatif des tonnages ait été en relation avec la liquidation par les entreprises de dépôts de munitions. A compter de fin 1930, les destructions se réduisirent fortement à hauteur de 6,5 tonnes / mois alors que d'après les archives, une autre entreprise serait active en Meuse, du nom de Costeaux. Cet infléchissement des rendements de destruction d'un facteur 20 serait possiblement en lien avec l'amenuisement des munitions directement récupérables sur les chantiers fouillés par les entreprises.

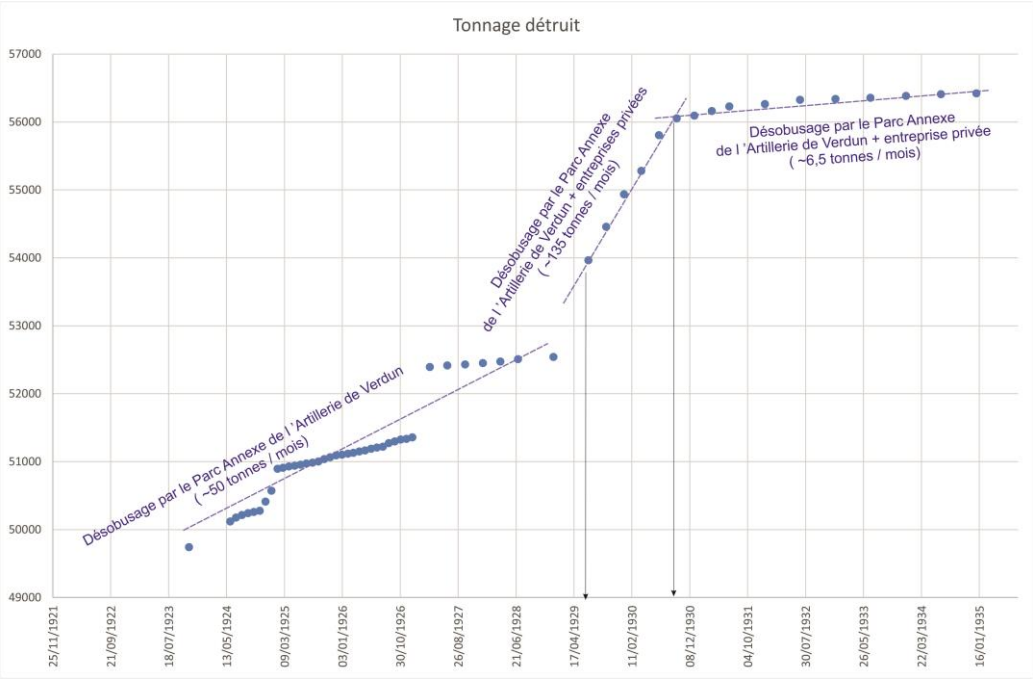


Figure 176 : Evolution des tonnages de Restes Explosifs de Guerre détruit dans le département de la Meuse entre 1923 et 1935[1207].

5.1.3 Un désobusage centré sur trois entreprises

La question de la survie des entreprises de désobusage se posa avec, en creux, celle de la pérennisation par l'Etat du dispositif opérationnel et administratif mis en place pour répondre aux obligations de sécurité publique selon les termes de la Loi du 17 avril 1919. Le nombre d'entreprises actives dans le domaine du désobusage se restreignit drastiquement dans les années 30. Trois entreprises du désobusage sous contrat avec l'Etat ont été identifiées.

Meyer & Delaire

L'entreprise Meyer & Delaire obtint en février 1930 le marché de récupération pour la 6e Région militaire (Meurthe-et-Moselle et la Meuse), qui aurait dû arriver à échéance le 31 décembre 1931, prolongé au 31 décembre 1932 pour achever les travaux de récupération dans la *zone rouge* de la région de Verdun. L'entreprise était opératrice des travaux de récupération dans les départements de la Marne et des Ardennes en date du 3 mai 1930[1208]. Ce qu'il advint des activités de cette entreprise dans les années 30 reste obscur.

[1207] D'après les rapports d'exécution des prescriptions de la lettre préfectorale n°21.767 du 12 octobre 1925. VIe Corps d'armée. Place de Verdun. Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82.

[1208]. Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN3-675. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie. Monsieur le Ministre de la Guerre à M. le Général Commandant l'Artillerie de la 6e Région, Paris le 3 mai 1930. Marchés de récupération.

Les seuls éléments extraits des archives sont la mention à la cote GR 9 NN3-675 sous le numéro d'ordre 2917 du « *marché Meyer & Delaire* » puis « *Liquidation judiciaire de la société Meyer & Delaire* ». Très possiblement, l'entreprise disparut au début des années 30 à une date non identifiée dans les archives consultées.

Deux marchés singuliers furent attribués à des entreprises pour l'exécution des travaux de récupération spécifiquement dans deux camps militaires du département de la Marne (anciennement *zone rouge*) de la 6e Région militaire: le marché Berge pour Tahure et le marché Géré pour le camp de Châlons (tout deux visant l'actuel camp militaire de Suippes).

Savot* Frères & Cie et *Berge

Les entreprises Savot Frères & Cie et Berge se virent attribuer (en mars 1929 et janvier 1930) les marchés pour respectivement les 2e (Picardie, Champagne) et 1re Régions (départements du Nord et du Pas-de-Calais) militaires, pour des durées de 2 à 3 ans. Savot Frères & Cie exploita deux usines à Coucy-le-Château (département de l'Aisne) et à Albert (département de la Somme) (cf. Figure 177), mais aussi à la Chapelle-Saint-Ursin (département du Cher) pour le grillage de fusées d'artillerie provenant de l'Ecole Centrale de Pyrotechnie de Bourges[1209].

Face aux difficultés conjoncturelles qu'elles connurent, les entreprises se regroupèrent au sein d'une Chambre syndicale des Entrepreneurs de Désobusage et de Récupération identifiée dans les archives en mars 1931. Les entreprises adjudicataires affiliées pour faire poids demandèrent alors aux mandants des allègements de charges (notamment celles liées aux contrôles), le remboursement partiel des cautionnements, pour l'exécution de leur contrat, par voie d'avenants, mais aussi la prorogation des dates d'échéance de leurs paiements.

Pour certaines d'entre elles, identifiées dans les archives, « *La récupération des matières inertes est suspendue en raison de la crise économique, pendant une durée de deux années à compter du 1er janvier [ndlr : 1932]. La date d'expiration du marché est repoussée d'un temps égal ; par suite elle est fixée au 31 décembre 1934*[1210] ». Aucune trace dans les archives si ce projet d'avenant (« *Avenant n°2 au marché passé entre le Lieutenant-Colonel Commandant provisoirement le Parc Régional d'Artillerie de Metz, représentant le Ministre de la Guerre, et Messieurs E. et H. Meyer & Delaire […] pour la récupération à partir du 15 février 1930 des épaves de guerre sur le territoire de la 6e Région* ») signé par le commandement du PAR de Metz, a été ou non mis en application et suivi dans des faits.

Progressivement, les besoins de désobusage se concentrèrent sur des zones de plus en plus restreintes et bientôt contrôlées par l'Etat, dans les anciennes *zones rouges* réduites à la portion congrue, qui subsistaient encore. Le marché de la récupération et du désobusage était de toute évidence devenu de moins en moins attractif et rémunérateur. Cette conjoncture n'a-t-elle pas précipitée l'implosion du désobusage commercial, par le retrait des affaires de sociétés ayant eu jusqu'alors sur cette niche pignon sur rue ?

[1209] Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28-29. Procès verbal constatant des renseignements au sujet de la destruction d'explosifs sur le territoire de la commune de la Chapelle Saint-Ursin par deux sociétés. Gendarmerie nationale, 5e Légion, Compagnie du Cher, 19 mai 1929.

[1210] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Parc d'Artillerie Régional de Metz. Projet d'avenant au marché de récupération. Metz le 4 décembre 1931. Le Lieutenant-Colonel Cottel, Commandant provisoirement le PAR de Metz.

Figure 177 : a) Vue d'ensemble du site industriel de désobusage et de ferraillage des matériaux issus du front. Site Savot Frères & Cie, route de Bouzincourt à Albert (département de la Somme), b) Monsieur Savot, directeur des chantiers de désobusage d'Albert dans son bureau avec quelques échantillons de ses découvertes. Monsieur Savot est un blessé de guerre, et directeur de l'entreprise de désobusage et de récupération Savot Frères & Cie[1211]. Vers 1936.

[1211] National Archives, Washington D.C., number RG 306-NT, box 367, *op. cit.*

5.2. LEON BERGE. UN DESOBUSEUR ET RECUPERATEUR ARRAGEOIS EN TERRES MEUSIENNES

Léon Berge, acteur majeur dans le Nord Pas-de-Calais, fit la demande auprès du commandement du PAR de Metz, le 11 avril 1930 de vouloir céder « *par voie de substitution* » son marché de gré à gré pour « *la recherche et la destruction de munitions et engins dangereux, ainsi que des épaves métalliques inertes du Camp de Tahure* » approuvé le 20 avril 1927 et de son avenant (expirant le 31 mars 1931) à l'entreprise de récupération anciennement lilloise (et titulaire des marchés de récupération des épaves métalliques des départements du Pas-de-Calais, du Nord et de l'Aisne), devenue (pour les circonstances ?) rémoise, Mazelier Frères & Fils (Alexandre et Eugène), agréée par le Ministère de la Guerre aux adjudications des marchés de la guerre et particulièrement de désobusage.

Une pareille demande fut adressée par l'entreprise Meyer & Delaire en ce qui concerne le département de la Marne. Il en fut de même de l'entreprise Géré, adjudicataire du marché de travaux de ramassage de caffûts et de débris métalliques dans les champs de tir du camp de Châlons approuvé le 29 octobre 1929 et expirant en décembre 1929[1212]. Les trois entreprises s'étaient de toute évidence concertées et accordées pour cette demande, les courriers de demande émanant de ces trois entreprises étant aussi similaires en tous points. L'argument « vendeur » pour l'Etat, avancé par les entreprises était d'unifier la totalité des travaux de récupération et de désobusage dans les mains d'un seul entrepreneur dans les départements de la Marne et des Ardennes pour limiter les risques de litige et réduire les frais engagés par l'Etat.

Mazelier appuya la demande des trois entreprises[1213]. Mazelier était bien connu du Ministère de la Guerre pour des faits et pratiques dans la 1re Région qui ne contribuèrent pas à sa publicité dans la 6e Région « *les renseignements que j'ai eu, autrefois, tant au Ministère même, qu'auprès de l'autorité locale de la 1re Région, ne me font nullement désireux d'entrer en relations directes avec l'entreprise Mazelier* [1214]». Le projet de cession fut rejeté.

Le contrat Berge de Tahure devait arriver à échéance le 31 mars 1931 mais l'industriel ne sût pas tenir ces délais notamment dans ses obligations de remise en état des sols. Restaient aussi en souffrance la démolition de 40 tonnes de munitions et l'enlèvement des baraquements (secteurs de Ripont, du Pont de la Dormoise, de Perthes, de Beauséjour) qui, se trouvaient dans les zones ciblées par les exercices de l'Artillerie. Ce marché Berge de Tahure fut passé alors qu'un marché dans la 6e Région militaire, plus ancien, contracté avec Berge était toujours en vigueur (date d'expiration 15 février 1930). Ce marché visa l'élimination d'un dépôt de munitions à proximité de Verdun[1215] « *On pourrait signaler également pour mémoire le marché passé dans la 6e Région avec M. Berge pour l'exploitation de dépôts de munitions. Ce marché auquel se rattache la destruction d'un stock d'obus toxiques dans la région de Verdun a expiré le 15 février 1930 mais n'est pas encore liquidé* ».

[1212] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Société anonyme des entreprises Géré à Monsieur le Général de Division, Commandant l'Artillerie du 6e Corps d'Armée. Metz. Le 10 avril 1930. Signé : illisible.

[1213] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Entreprise Alexandre Mazelier. Désobusage & Récupération du département de la Marne. A Monsieur le Général de Division Charet, Commandant l'Artillerie du 6e Corps d'Armée à Metz (Moselle). Reims, le 12 avril 1930.

[1214] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. 6e Région. Commandement de l'Artillerie. Le Général de Division Charet, Commandant l'Artillerie de la 6e Région à Monsieur le Ministre de la Guerre, 3e Direction. Metz, le 22 avril 1930. Signé : ilisible.

[1215] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. La seule référence archivistique identifiée, attestant de la destruction d'engins chimiques en Meuse vers 1929, est la plainte du Maire de Brandeville (au nord-ouest de Verdun) du 17 mai 1929 au sujet des risques liés au pétardement, vidage et brûlage des obus chimiques très près des habitations de cette commune.

La localisation de ce chantier en Meuse et la nature des opérations de l'entreprise Berge restent obscures à ce stade des recherches. Deux seules opérations de destruction d'engins toxiques initialement entreposés dans des dépôts dans la région de Verdun autour de 1929 ont été identifiées dans les archives. Le premier est celui de Brandeville (arrondissement de Montmédy) sur l'ancienne voie stratégique allemande de la Woëvre, au nord de Verdun. Le 17 mai 1929, V. Hucbourg, maire de Brandeville adressa une lettre de réclamation, au nom du conseil municipal et de la population, au Préfet de la Meuse s'insurgeant contre les nuisances occasionnées par l'élimination de l'ancien dépôt de munitions allemand où « *Non seulement les obus sont retirés de ce lieu, mais chaque jour les ouvriers qui y travaillent, ou en font éclater, ou les ouvrent pour en brûler la poudre ou en extraire les vapeurs ou gaz toxiques*[1216] ». Ces démolitions auraient été reprises à la fin des années 20 après qu'une première phase de désobusage visant ce dépôt, possiblement menée par l'Artillerie, ait été engagée durant les années de sortie de guerre « *[…] ces vapeurs toxiques nuisent à la végétation, et il est à craindre qu'elles ne causent des accidents nombreux parmi le bétail que l'on commence à mettre en pâture dans les parcs avoisinants ; comme cela s'est produit pendant les deux ou trois années qui ont suivi la guerre* » concluant par « *Il n'est pas admissible que de pareilles pratiques aient lieux dix ans après la guerre, à une si faible distance des villages [..]* ». En 1933 d'autres réclamations suivirent, celle de l'acquéreur des terrains (au lieudit « La petite Core ») demandant à l'autorité préfectorale si « *ledit terrain pourrait être exproprié ou si j'ai droit à une indemnité* » tant le terrain était bouleversé « *par des trous d'obus mesurant jusqu'à 6 m de profondeur sur 15 de diamètre et renferme encore des obus non explosés*[1217] », l'ancien propriétaire comme le nouveau n'ayant perçu, ni l'un ni l'autre, des indemnités compensatrices au titre des dommages de guerre par l'administration des Régions Libérées.

Les activités de désobusage de Berge en Meuse sont avérées au regard des rapports d'exécution des prescriptions de la lettre préfectorale n°21.767 du 12 octobre 1925 (VIe Corps d'Armée. Place de Verdun. Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82). L'entreprise aurait contribué aux démolitions de REG en Meuse entre 1929 et au moins avril 1930.

Le second site nous emmène en pleine *zone rouge*, à deux pas d'un haut lieu mémoriel de la Grande Guerre, la Tranchées des Baïonnettes à Douaumont. Les Ravins du Helly et du Chaufour, théâtres de violents combats pendant la bataille de Verdun, virent s'installer dès la sortie de guerre des installations de désobusage industriel. En consultant le Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR9 NN3-574, un intercalaire de classement fait état au numéro 2719 d'une chemise intitulée « *Enfouissement d'obus toxiques. Ravin du Hélly. Régions Libérées, Berge* ». Il était de toute évidence fait mention à un contrat des Régions Libérées attribué à Berge, Tréfilleries et Laminoirs du Havre pour l'enfouissement au Helly d'obus chimiques. Le dossier qui devait suivre cet intercalaire était vide. Sur place, au Helly, une reconnaissance de terrain montra que les sols étaient parsemés de fragments de métaux, obus et caffûts avec une densité inhabituelle, associés à de nombreux barbelés et restes de baraquements en tôle ondulée cintrée, possiblement les restes d'installations d'un chantier de désobusage (cf. Figure 178).

[1216] http://1ber.free.fr/Brandeville/histoire/Guerre1914-1918.html

[1217] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Monsieur Sébastien Guillaume à Monsieur le Préfet de la Meuse. Bréhéville, le 21 avril 1933.

Figure 178 : Munitions (75 mm, 150 mm) non explosées et fusées à l'affleurement dans le Ravin du Hélly, Douaumont[1218].

[1218] Hubé, D. (2017)

5.3. LE GLISSEMENT TOURMENTE DU DESOBUSAGE D'UNE GUERRE A L'AUTRE. SUITE ET FIN DE L'ELIMINATION INDUSTRIELLE DES ENGINS DE 1914-1918

Léon Berge était l'une des deux seules entreprises de récupération et de désobusage dont l'activité, est encore, bien qu'en pointillé, traçable dans les archives dans les années 30. Les secteurs géographiques d'intervention de Léon Berge, avant 1929 s'étendant sur de nombreux départements parmi lesquels le Nord, le Pas-de-Calais, l'Oise, l'Aisne, les Ardennes, la Marne, la Meuse et la Meurthe-et-Moselle. A compter de 1929, avec le marché unique n°119 de Berge daté du 25 mars 1929, son périmètre se restreignit au Nord et au Pas-de-Calais (1er Région militaire) « *Seit 1929 bleibt die Tätigkeit vorwiegend in Pas-de-Calais und Nord konzentrie*rt [1219]». L'entreprise avait certainement eu les reins financiers suffisamment solides, avec des recettes alimentées par un nombre de chantiers de récupérations importants, pour surmonter les difficultés conjoncturelles des années 30. Elle se concentra ensuite dans le Nord Pas-de-Calais, où, historiquement, les plus forts tonnages de munitions anciennes avaient été abandonnés. Le contrat fut prolongé à six reprises par voies d'avenants entre 1929 et 1934. Ce marché arriva à expiration le 31 décembre 1939 alors que la guerre venait d'être déclarée par l'Allemagne nazie à la France. Le 24 janvier 1941, les préfets du Nord et du Pas-de-Calais autorisèrent l'entrepreneur à poursuivre provisoirement ses opérations. Il obtint le 22 septembre 1941 de la *Kreiskommendatur* d'Arras l'autorisation de déplacer son vaste champ d'explosion de Fampoux (département du Pas-de-Calais) sur un terrain à réquisitionner, à 400 de là, pour ne pas endommager une ligne à haute tension qui venait d'être installée non loin. La *Kommendatur* lui intima « *Il est nécessaire de procéder le plus tôt possible à l'explosion des engins non éclatés*[1220] ». Les activités de démolition des projectiles anciens de la Grande Guerre se poursuivirent dans cette région pendant la Seconde Guerre mondiale sous occupation allemande. En novembre 1941, un service d'Etat de désobusage fut créés et il fut explicitement demandé par le Préfet du Pas-de-Calais aux maires du département de ne plus livrer les obus, grenades et autres bombes d'aviation à Léon Berge mais de les signaler au service nouvellement créé pour cela. Il s'agit des dernières traces identifiées dans les archives consultées relatant les activités de cet entrepreneur et de celles ayant démoli à grande échelle ceux de la Grande Guerre. Mais pas tout à fait.

La seconde entreprise dont l'activité de récupération semblât perdurer dans l'entre-deux-guerres fut Savot Frères & Cie**.** Un reportage du *New York Time*[1221] datant de 1937 documenta d'une manière très précise, et avec une intention esthétique dans ses prises de vue photographiques, les opérations de récupération et de désobusage en France. Cet ensemble de près de 100 photographies constitue un corpus unique, exceptionnel par sa qualité, sur ce que furent les méthodes, moyens de la récupération et du désobusage dans l'entre-deux-guerres, et la réalité de la « pollution pyrotechniques » des sols de France induite par les bombardements de la Grande Guerre, encore visible, dangereuse, 20 ans après la cessation des hostilités, lorsque l'article parut le dimanche 3 mai 1938[1222].

[1219] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Kreiskommendatur Arras. Sprengplatz in Fampoux. Arras, 22.09.1941. Signé : Major und Kommandant. Illisible. « Depuis 1929, son activité se concentre majoritairement dans le Pas-de-Calais et dans le Nord »

[1220] *Ibid.*

[1221] National Archives, Washington D.C., number RG 306-NT, Box 367. « *Echoes of the World War in the "Red zone"* ». Photogravure. Picture Section. *The New York Time*. Sunday, May 3, 1938. Non signé. *op. cit.*

[1222] *Ibid*

Les 2/3 des clichés visaient les différentes unités semi-industrielles (cellules de dévissage / désamorçage, fours de grillage des fusées, etc.) du site d'Albert (département de la Somme) mais aussi celles d'une troisième entreprise siégeant à Coucy-le-Château (département de l'Aisne) dont il sera question plus loin, mettant par-là clairement en exergue les dimensions industrielles du ferraillage de récupération et en creux le caractère industriel de la Grande Guerre à l'origine de l'introduction dans les sols de ces quantités astronomiques de métaux (cf. Figure 177). L'activité et les méthodes des récupérateurs lors de tournées de recherche des vieux métaux sur les anciennes tranchées de la « zone rouge » furent également photographiées (cf. Figure 179). A Coucy-le-Château, le photojournaliste tint à montrer, par des poses et mises en scène, la dimension devenue si ordinaire d'une activité pourtant extraordinaire de gestion et de destruction de ces « *reliques des jours de guerre*[1223] ».

Aucune archive collectée dans le cadre de ce travail n'a permis de connaître la date et les modalités de cessation des activités de l'entreprise Savot Frères & Cie. Le site d'Albert a été parfaitement géo localisé (route de Bouzincourt) à l'aide des clichés du *New York Time*. Les clichés photographies aériens de l'IGN les plus récents, en ligne, datant de 1946, pointant ce site montrent la présence d'installations d'apparence industrielle d'une configuration proche de celle de Savot Frères & Cie, sans qu'il soit possible de savoir s'il s'agit là de la poursuite ou non de ce type d'activité.

Les découvertes et les démolitions d'engins de guerre se sont poursuivies dans la Somme à la faveur des opérations de recherche d'engins enfouis qui ont été entreprises par Savot Frères & Cie: 67 000 obus en 1936 et 207 186 obus en 1937[1224]. 90 000 tonnes de matériel de guerre en tout genre (projectiles, caffûts et autres ferrailles inertes, etc.) furent récupérées sur les anciens champs de bataille de la Somme entre 1925 et 1937. Plus d'un million d'obus et de bombes furent découverts puis détruits[1225].

Un marché de désobusage approuvé le 15 novembre 1929 par le Ministre de la Guerre pour les années 30, 31, 32 dans les départements de l'Aisne et les arrondissements ardennais de Charleville - Mézières, Rocroi et Sedan fut modifié par avenant le 28 janvier 1932 et le 25 août 1933 prolongeant le marché initial jusqu'à fin 1937. La raison sociale du titulaire du marché était la Société de Désobusage et de Récupération à Coucy-le-Château. Le contrôle permanent du marché fut confié au Capitaine Colin du Parc d'Artillerie Régional de La Fère. L'entreprise Savot Frères & Cie se vit attribuer (en mars 1929) les marchés pour la 2e Région militaires, pour des durées de 2 à 3 ans. L'entreprise avait clairement affiché sur les en-têtes de ses courriers officiels l'existence de son chantier de Coussy. Il est possible que sous la dénomination et raison sociale Société de Désobusage et de Récupération se cacha l'entreprise Savot Frères & Cie. Les conditions d'application de ce marché renseignées dans les archives montrèrent un glissement net dans la nature même des matériaux visés par la récupération par rapport à ceux extraits des sols des anciens champs de bataille.

[1223] National Archives, Washington D.C., number RG 306-NT, Box 367, op. cit. Légende traduite d'une photographie de l'Article du 3 mai 1938.

[1224] *Ibid.*

[1225] *Ibid.*

Figure 179 : 1936-*1937. a)* D*écouverte d'un obus tiré et non explosés de 380 mm allemand dans un fossé*[1226]*, b)* R*écupération d'obus dans les anciennes tranchées, et c)* U*ne équipe de récupérateurs sonde et fouille l'ancienne Zone rouge fraichement replantée de conifères à Albert (département de la Somme)*[1227]*.*

[1226] National Archives, Washington D.C., number RG 306 – NT, Box 375, *op. cit.*

[1227] *Ibid.*

Entrèrent dans le champ de la récupération, au côté des vieilles ferrailles inertes et des engins de guerre, les métaux détenus par les tiers, notamment les clôtures provisoires établies par des particuliers depuis la cessation des hostilités, tôles utilisées pour la protection des immeubles en ruine et installations telles que prises d'eau, abreuvoirs, baraques, etc. « *C'est-à-dire tout le matériel laissé par l'administration à la disposition des sinistrés pour leurs installations provisoires, dès qu'ils redevient libre de son emploi primitif s'il n'a pas fait l'objet de cession régulière (imputation sur les dommages de guerre ou factures acquittées* »[1228]).

La population des zones concernées fut incitée par voie d'affichage de signaler aux entrepreneurs les engins et matériels de guerre découverts, les municipalités et leurs agents devant jouer le rôle de facilitateurs pour localiser les découvertes et y avoir accès. L'élargissement de la récupération aux vieilles ferrailles sans lien avec les munitions de la Grande Guerre fut certainement rendu nécessaire par l'amenuisement des tonnages de munitions et éléments de munitions collectés sur les anciens champs de bataille, afin de pérenniser l'activité.

Furent enfin mises en place des procédures par voie de Gendarmerie pour sanctionner les récupérateurs illégaux préconisée par les rapports de 1930. « *Les personnes qui, en dehors de l'entreprise ou de ses agents, seraient prises en flagrant délit de récupération, de transport, ou de négoce de matériel et matériaux faisant l'objet du […] marché ou de démontage d'obus, de grenades ou de cartouches, seraient justiciables des tribunaux*[1229] ».

L'entreprise installée à Coucy-le-Château aurait démoli selon le *New York Time* entre 1931 et 1937 1 650 000 tonnes de munitions. Ces sources peuvent être discutées, s'il n'y a pas eu confusion entre tonnage et nombre de projectiles éliminés. L'activité de la Société de Désobusage et de Récupération semblât possiblement s'interrompre vers 1937 avec l'arrivée à échéance de son contrat mais aussi avec la survenue d'un évènement politico-judiciaire insolite qui décapita l'entreprise.

[1228] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote 22 R 2-497. Coucy. Ministère de la Guerre. Artillerie. Parc d'Artillerie Régional de La Fère. 2e Avenant au cahier des charges spéciales relatif à un marché de récupération des munitions et des épaves de guerre existant dans la 2e Région à la date du 1er janvier 1930, concernant le 2e Secteur (Aisne et Arrondissement de Mézières), approuvé par D.M., n° 79. 928-2/3 du 15 novembre 1929. La Fère, le 28 janvier 1932. Signé : le Lieutenant-Colonel Beaufist.

[1229] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport particulier n°7/30 du 10 novembre 1930 au sujet du désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Non signé.

L'AFFAIRE DU C. S. A. R.

Le directeur d'une usine de Coucy-le-Château est arrêté

Il avait fourni une partie des explosifs et des armes trouvés à Annet-sur-Marne

L'enquête sur le C. S. A. R. a été marquée, hier, par une nouvelle arrestation: celle d'un directeur d'usine de Coucy-le-Château, M. François Georges, qui avait fourni une partie des armes et explosifs découverts, le 19 février, dans la carrière abandonnée d'Annet-sur-Marne.

M. Georges, qui est gérant d'une société de désobusage et de récupération, opérant depuis la guerre dans les régions envahies, aurait avoué aux commissaires Jobard et Delsay qu'il était, depuis le début de l'année dernière, en relations suivies avec l'ingénieur Michel Harispe, arrêté en septembre, au début de l'affaire des « Cagoulards ».

M. Harispe lui ayant demandé de lui fournir des munitions et du matériel, M. Georges lui vendit d'abord, pour 4.000 francs, un lot de soixante-dix fusils de guerre français et étrangers, deux mitrailleuses allemandes — d'ailleurs incomplètes — et 300 kilos de cartouches, puis, par la suite, pour 1.000 francs : 25 kilos de cheddite, 800 détonateurs et des pétards de cavalerie.

Un mandat d'arrêt a été décerné par M. Béteille, juge d'instruction, contre M. Georges, qui a été écroué à Laon, en attendant son transfert à Paris.

François Georges, gérant de la Société de Désobusage et de Récupération, fut arrêté et déféré devant la justice en mars 1938 suite à ses aveux d'avoir fourni secrètement des armes et des explosifs à l'organisation complotiste CSAR (Comité Secret d'Action Révolutionnaire), encore surnommée « La conspiration de la Cagoule » suite à la découverte par les autorités dans une cache à Annet-sur-Marne (département de Seine-et-Marne) de quatre mitrailleuses non identifiées le 19 février 1938[1230]. La Société de Désobusage et de Récupération aurait livré au CSAR des fusils, des cartouches, des détonateurs ainsi que des explosifs chlorates (cf. Figure 180 ci-contre). Le CSAR, réseau factieux anticommuniste, fut une tentative insurrectionnelle[1231] « *effectuée dans son vague but de coup d'État contre le régime du Front Populaire*[1232] ». Plus qu'une association de malfaiteurs, elle préfigura par ses actes de violence les mouvements terroristes des années 60- 70 en Europe. Dans sa volonté de préparer et effectuer son coup d'État, la Cagoule se mit à utiliser des méthodes terroristes pour amener des conditions sociales et politiques plus favorable. Le 11 septembre 1937, deux attentats à la bombe eurent ainsi lieu à Paris dans le quartier de l'Étoile contre la Confédération Générale du Patronat Français.

Figure 180 : Extrait du Figaro du 4 mars 1938[1233].

Figure 181 : Fusils et mitrailleuses allemandes perquisitionnées[1234].

[1230] Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité. On a trouvé dans l'arsenal d'Annet divers modèles de bombes allemandes.* (Lucien Sampaix). 23 février 1938, p. 2.

[1231] Monier, F., (1998). *Le CSAR, terrorisme et tentative de putsch*. In *Le complot dans la République. Stratégies du secret, de Boulanger à la Cagoule*, sous la direction de Monier Frédéric. Paris, La Découverte, L'espace de l'histoire, p. 297-320. URL : https://www.cairn.info/le-complot-dans-la-republique--9782707128713-page-297.htm

[1232] Soudet, A. (2021). *La Cagoule, l'histoire de la préparation d'un complot d'extrême droite*. Mémoire pour obtention d'un diplôme de Master en Histoire, civilisation, patrimoine : Sciences Historiques. Présenté le 23 juin 2021. Mémoire effectué sous la direction de Marc André, Maître de conférences en histoire contemporaine à l'université de Rouen, et de Jean-Numa Ducange, Professeur des universités spécialisé en histoire contemporaine à l'université de Rouen.

[1233] Bibliothèque nationale de France. *Le Figaro* du 4 mars 1938.

[1234] Photo © Collection Dupondt/AKG-Images.

La Cagoule fabriqua des explosifs, vola des armes, acheta des armes légalement, ou même récupéra des armes de la Première Guerre mondiale à une époque où les Français avaient le droit de s'armer et où le cadre réglementaire fixant les conditions sur l'acquisition, le port d'armes, était emplis de zones d'ombre. Le CSAR s'adonna donc à un trafic d'armes (dont les armes anciennes de la Grande Guerre) récupérées sur le territoire français auquel la Société de Désobusage avait accès. Les liens entre cette organisation et les activités de désobusage commercial de l'entre-deux-guerres n'avaient pas été identifiés jusqu'alors par les travaux de recherche historiques portant sur le CSAR. Le 11 janvier 1938 la presse annonça l'arrestation de trois des auteurs des attentats de l'Étoile mettant fin aux agissements du CASR. Marx Dormoy, responsable du démantèlement de la Cagoule, fut assassiné en représailles le 26 juillet 1941.

5.4. LA SECONDE GUERRE MONDIALE. POINT D'ARRET DU DESOBUSAGE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL ?

La Seconde Guerre mondiale mit un point d'arrêt final en France à ces activités de désobusage industriel et contractuel visant les REG de la Première Guerre mondiale. Les dernières traces de ces activités sont celles relatives au chantier Berge de Fampoux en 1941.

Les circonstances de la défaite française de 1940 imposèrent aux autorités de recentrer l'élimination des engins de guerre sur ceux réclamés par le *Reich* et son allié italien (via la Convention Allemande d'Armistice (CAA) et la Convention Italienne d'Armistice (CIA)). La poursuite de la guerre contre l'Angleterre, après l'Armistice de 1940 avec la France, conduisit le *Reich* à s'assurer des garanties absolues du désarmement de la France. La CAA exigea la démobilisation et le désarmement des Forces Françaises et par conséquent leur réduction au niveau consenti pour l'Armée à l'armistice. Par ordre du *Führer,* la délégation allemande exigea ainsi comme garantie du désarmement des forces françaises, conformément à l'Article 5 de la Convention d'armistice, la livraison des armes, munitions et matériels appartenant aux unités de l'armée française[1235] :

- « *La totalité des munitions de l'artillerie légère et lourde ;*
- *La totalité de celles de l'ALVF (Artillerie Lourde sur Voie Ferrée) ;*
- *La totalité des projectiles anti-char de 8 mm, 13 mm et plus ;*
- *La totalité des projectiles de DCA de 13 mm et plus ;*
- *La totalité des produits chimiques de Guerre (munitions, appareils et produits toxiques, y compris les produits bruts, exclusivement destinés à la production de gaz de combat.*

Signé: Von Spulnagel, Général d'Infanterie, Wiesbaden 05/08/1940. La CAA., E.M. n° 121/40 »

La France défaite fut ainsi sommée d'éradiquer son arsenal durant la Seconde Guerre mondiale. Les territoires alpins où, par électrochimie la France produisait historiquement du chlore et, en dérivant, des toxiques de guerre et les munitions qui en étaient chargées, étaient particulièrement visés, sous le contrôle de la CIA. Des munitions chimiques de la Grande Guerre étaient restées stockées dans certains sites de chargement, en attente d'une solution de déchargement économiquement rentable qui tardait alors que l'*Ypérite* de ces engins se figeait dans les *casings*. La solution industrielle fut trouvée en 1949. Pour des raisons de sureté, le site a volontairement été laissé anonyme

[1235] Archives nationales, site de Pierrefitte, cote 19970302/5. Von Spulnagel, Général d'Infanterie, Wiesbaden 05/08/1940. La CAA., E.M. n° 121/40

6. Résumé et conclusions de la Section 8h

Fin 1919, les anciens champs de bataille et leurs abords étaient encore constellés de Restes Explosifs de Guerre tandis que les reconstructions se poursuivaient, la récupération et le désobusage militaires de la période 1918-1919 ayant été superficiels et partiels, les moyens humains et matériels alloués ayant été nettement sous-dimensionnés par rapport à l'ampleur de la tâche à accomplir. Un changement important survint dans l'organisation et le fonctionnement de la récupération et du désobusage en 1920 avec la démobilisation des contingents militaires, français comme alliés, puis le renvoi en Allemagne des Prisonniers de Guerre, parmi lesquels ceux mis au travail, contraints et forcés, pour récupérer et désobuser. La démobilisation des hommes en armes au sein de l'armée française se termina progressivement jusqu'en 1920 alors que les Américains de l'AEF, avec leurs unités de récupération (*Salvage),* quittèrent le territoire national en à peine 6 mois. Les Britanniques démobilisèrent aussi très rapidement en 1919 et 1920 tandis que l'entrée en vigueur en octobre 1919 du Traité de Versailles autorisait le retour chez eux, par vagues successives, des Prisonniers de Guerre allemands.

L'Etat français se retrouva donc rapidement non seulement seul face à la problématique du débarrassage des anciens champs de bataille de leurs engins pyrotechniques qui entravaient les libres reconstructions, mais aussi dépourvu de la main d'œuvre militaire nationale jusqu'alors en charge de cette tâche. Cette situation avait été anticipée dès 1919 par le Ministère de la Guerre et le Ministère des Régions Libérées, année durant laquelle furent signés par l'Etat, avec l'entreprise civile et privée Clere & Schwander, des contrats pour la liquidation des vastes dépôts de munitions de Spincourt (Meuse) et de la Hardt (Haut-Rhin). La solution pour poursuivre la récupération et le désobusage en absence de main d'œuvre militaire fut trouvée : l'externalisation de la mission par la passation de contrats avec des prestataires privés (adjudicataires).

La finalité même de la récupération et du désobusage évolua elle aussi. Neutraliser les Restes Explosifs de Guerre ne visaient plus uniquement à annihiler leurs fonctionnalités militaires et leurs dangers, mais aussi à récupérer toutes les matières valorisables constitutives des engins et en premier chef les métaux (acier, fonte, cuivre, zinc, plomb, etc.). En effet, d'important progrès dans la sidérurgie permirent dès 1920, avec la mise au point des fours Martin-Siemens, de fondre et recycler des vieilles ferrailles pour en faire des aciers performants. Les REG (au sens du Protocole relatif aux Restes Explosifs de Guerre, adopté en novembre 2003) changèrent rétrospectivement de statut, passant de déchets de guerre (au sens de la Loi du 15 juillet 1975) à celui de matières premières secondaires valorisables, dont les reconstructions avaient grandement besoin.

Deux types marchés furent conclus dans chacune des 1er, 2e, 6e Régions militaires, là où les duels d'artillerie furent particulièrement intenses et violents et où, par conséquent, le désobusage porta sur des tonnages de projectiles très importants, (i) les marchés « des Régions Libérées » qui visaient la récupération des vieilles ferrailles inertes, c'est-à-dire ne renfermant aucune matière explosible et (ii) les marchés « du Temps de Guerre » qui visaient explicitement les Restes Explosifs de Guerre. Les marchés furent attribués par département, pour certains d'entre eux (comme l'Aisne), subdivisés en sous-secteurs (lots) selon l'importance des travaux à réaliser (du tonnage à récupérer). Le premier marché militaire « du Temps de Guerre » fut passé le 19 mai 1920 par le commandant l'Artillerie de la 1re Région, opérant pour le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) avec la société F.N. Pickett & Fils pour la démolition de 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes entreposées dans la forêt de Trélon (département du Nord).

Dans les 7e et 20e Région militaires, les combats intenses d'artillerie n'intéressèrent que des zones d'étendue relativement restreinte, et la Direction de l'Artillerie (DA) ne jugea pas nécessaire d'y recourir systématiquement à des contrats, le désobusage fut pris en charge directement par les Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) après signalement des engins.

Les premières adjudications furent conclues sans mise en concurrence (en gré à gré) au motif des exceptions prévues par l'Article 18 du Décret du 18 novembre 1882 sur les marchés publiques (travaux que des nécessités de sécurité publique empêchent de faire exécuter par voie d'adjudication et travaux qui, dans les cas d'urgence évidente amenées par des circonstances imprévues, ne peuvent pas subir les délais des adjudications). Le choix des entreprises et le contrôle de l'exécution des marchés furent confiés à la DA (au commandement des PAR des Régions militaires concernées).

La revente des vieilles ferrailles formant les engins de guerre aux sidérurgistes pouvait s'avérer lucrative pour les entreprises de récupération, mais s'agissant de matières propriétés d'Etat, les produits de la récupération étaient cédés aux entrepreneurs contre le versement au Trésor d'une redevance à la tonne, indexée sur la nature des métaux, et suivant des barèmes propres à chaque type de marché. Les redevances applicables aux marchés « du Temps de Guerre » étaient moins élevées que celles « des Régions Libérées », car honorer ces derniers marchés étaient bien moins risqués que les premiers.

La coexistence de deux contrats dont l'exécution était assujettie à deux tarifications de redevance différentes, mais visant une seule et même matière devint rapidement problématique. Les matériels visés par les marchés militaires étaient bien plus rémunérateurs et attractifs que les ferrailles inertes des marches « des Régions Libérées », mais aussi bien plus dangereux. S'ensuivirent (i) des récupérations illicites (ii) de nombreuses fraudes par l'imputation d'un marché sur l'autre et (iii) de nombreux accidents, généralement mortels, de récupérateurs imprudents, inconscients, non formés au désobusage.

Ces agissements se firent en toute impunité, car aucun organe de contrôle, de police, aucune sanction pour le non-respect des règles des contrats, n'étaient prévus. Les clauses des cahiers des charges et les marchés souffrirent en effet de faiblesses et d'imprécisions se traduisant par des difficultés de contrôle et de gouvernance par les instances militaires en charge de la bonne exécution des contrats. De nombreux avenants furent également produits, afin d'ajuster les prix aux fluctuations des cours des métaux, et vinrent encore complexifier la gestion des contrats. La gestion du désobusage par voies contractuelles comportait un ensemble de procédures auxquelles les services de l'Artillerie n'étaient pas nécessairement préparés. L'armée était vraisemblablement mieux préparée et organisée pour mobiliser et faire la guerre qu'orchestrer dans le cadre général de la démobilisation, le désarmement contractuel des sols. Des anomalies dans la gestion des contrats par la DA furent constatées.

Cette récupération fut également confrontée à une autre difficulté : le retour de la légitimité de l'autorité civile face à l'autorité militaire omnipotente durant la guerre. Maires, Préfets et propriétaires fonciers pouvaient s'opposer aux projets d'installation de terrains d'explosion, à la présence des récupérateurs sur des terrains, etc.

La majorité des contrats arrivèrent tant bien que mal à échéance en 1928 et 1929, date à laquelle les entreprises Berge, Savot Frères & Cie et Meignie & Meyer se partagèrent à elles trois tous les contrats les plus lucratifs, à savoir deux du « Temps de Guerre ». L'organisation contractuelle fut alors repensée, avec notamment (i) le passage à un marché unique, (ii) la mise en place de procédures de mise en concurrence d'entreprises présélectionnées par la DA pour leurs compétences et les garanties financières et (iii) l'instauration d'un organe de police (la Gendarmerie).

Mais la période du passage au régime des marchés uniques coïncida aussi autour de 1930 avec celle de l'amorce d'une conjoncture extrêmement défavorable pour les récupérateurs et désobuseurs, avec d'abord la crise économique mondiale, qui vit s'effondrer les cours des métaux, puis l'amenuisement du stock de matériel potentiellement récupérable au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Seules survécurent à cela dans les années trente les entreprises possédant les reins financiers les plus solides et les périmètres de récupération les plus étendus, c'est-à-dire les anciens titulaires des marchés militaires, Berge, Savot Frères & Cie et Meyer (Meyer & Delaire). Les activités de Berge s'étendirent au-delà des limites de la 1er Région militaire puisqu'il exploita aussi au moins deux sites en Meuse, vraisemblablement à Brandeville et au Ravin du Helly à Douaumont tandis que Savot Frères & Cie était encore actif à Coucy-le-Château (département de l'Aisne) en 1937. Cette entreprise élargit son périmètre de récupération aux autres ferrailles qui étaient sans lien avec les munitions pour pouvoir pérenniser son activité, mais dut probablement mettre un terme à son activité en 1938 suite à la révélation d'activités illicites (la livraison d'armes de 1914-1918) en lien avec le mouvement complotiste et terroriste (CSAR, Comité Secret d'Action Révolutionnaire encore surnommé « La conspiration de la Cagoule »).

Les dernières traces d'activité de ces désobuseurs datent de 1941 et le chantier Berge de Fampoux, dont le terrain d'explosion dut être déplacé à la demande des autorités militaires allemandes *(Kreiskommendatur* d'Arras). La récupération et le désobusage industriel sous contrat visant les engins de la Grande Guerre cessa avec la Seconde Guerre mondiale. Les exigences de désobusage et d'éradication d'engins de guerre changèrent alors de finalité et d'objet : la France fut contrainte par les Commissions allemandes et italiennes d'armistice (CAA, CIA) de détruire en quelques semaines une grande partie de ses stocks de munitions, et permettre à l'Allemagne, en toute quiétude, avec une France démilitarisée, d'engager la bataille d'Angleterre. Œuvrer en ce sens dans ces délais était irréaliste. L'Allemagne faisait par ce biais lourdement payer à la France ce qu'elle eut à subir avec les exigences de l'armistice de 1918 et le « *Dictat* » du Traité de Versailles de 1919.

Le désobusage des anciens champs de bataille de la Grande Guerre ne fut pas mené jusqu'à son terme, car aujourd'hui encore, les démineurs de la Sécurité civile, évacuent et détruisent tous les ans des dizaines de tonnes de munitions anciennes (400 à 750 tonnes / an toutes guerres confondues) découvertes et mises à l'affleurement à la faveur de travaux agricoles, de terrassements, de curages d'étangs ou de cours d'eau. Selon ces professionnels, des centaines d'années seront encore nécessaires avant d'en venir à bout avec cet héritage de fer légué dans nos sols par cet évènement paroxystique de la violence guerrière que fut 1914-1918, orchestrée par l'artillerie, sur le front occidental.

Section 9h
Libération du Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL) des Restes Explosifs de Guerre et surplus ex-allemands. Pour en finir avec l'ancien occupant

1. Introduction de la Section 9h

Cette section est dédiée au désobusage et à la liquidation des dépôts de munitions principalement ex-allemandes abandonnés en masse par les Allemands en octobre-novembre 1918 dans les anciens territoires annexés du *Reichsland Elsass-Lothringen* (littéralement territoire impérial d'Alsace-Lorraine). Il me semblait important, au-delà de l'attachement personnel à ce territoire, d'accorder ici un développement spécifique de ma recherche à ce territoire singulier (alors désigné par Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL)), car le désobusage et la récupération sur et aux abords des anciens champs de batailles des régions occupées puis libérées décrites dans ce qui précède suivirent dans le TAL d'autres trajectoires elles aussi singulières en lien avec le contexte socio-politique du retour de l'administration française après plus de 40 ans de présence et de régime allemand et la pérennisation de particularismes régionaux. Cette section s'attache comme la précédente à établir des passerelles chronologiques entre d'une part la Première et la Seconde Guerre mondiale, mais aussi géographique, par des traits d'union entre la liquidation des dépôts ex-allemands en Alsace-Lorraine et celle en territoire allemand occupé (objet de la Section 10h du présent manuscrit).

2. Contexte historique. Le malaise alsacien-lorrain

2.1.1 De l'éblouissement tricolore au malaise alsacien-lorrain (1918-1919)

> *« Un grand nombre de magasins sont ornés de bandes bleu, blanc, rouge, où on lit : « Maison française » ou encore : « Changement de propriétaire »*[1236].

En novembre 1918, après 48 ans d'administration allemande, les territoires anciennement annexés du *Reichsland Elsaß-Lothringen (*territoire impérial d'Alsace-Lorraine, correspondant aux actuels départements du Bas-Rhin, du Haut-Rhin (territoire d'Alsace) et de la Moselle (territoire de Lorraine)), revinrent à la France conformément à l'Article II de l'armistice du 11 novembre 1918 « *Evacuation des pays envahis : Belgique, Luxembourg, ainsi que l'Alsace-Lorraine, réglée de manière dans un délai de 15 jours à dater de la signature de l'armistice* » et en accord avec le points 8 du programme de paix du président des Etats-Unis Woodrow Wilson (14 points exposés par le Président le 8 janvier 1918 devant le Congrès des États-Unis.) « *Tous les territoires français devraient être libérés, les portions envahies rendues, et les torts causés à la France par la Prusse en 1871, concernant l'Alsace-Lorraine, qui a perturbé la paix mondiale pendant près de 50 ans, devraient être corrigés, de telle sorte que la paix soit de nouveau établie dans l'intérêt de tous.* ».

[1236] René Weiss, Chef du Cabinet du Président du Conseil Munipal de Paris. *Le Premier Voyage Officiel en Alsace-Lorraine Française. 8, 9, 10 décembre 1918*. Paris. 28 juin 1919. Imprimerie Nationale.

La réappropriation militaire française de l'Alsace-Lorraine s'effectua selon des modalités définies le 6 octobre 1918 au cours d'une conférence tenue à l'initiative du maréchal Foch. Elle n'attendit pas les 15 jours stipulés par l'armistice. Les troupes françaises entrèrent triomphalement ainsi à Mulhouse le 17 novembre, à Colmar le 18 novembre (général Messimy), solennellement à Metz le 19 novembre (général Pétain) et le 22 novembre 1918 à Strasbourg (Xe Corps d'Armée du général Gouraud (IVe Armée)). Entre le 8 et le 10 décembre 1918, les vainqueurs, avec à leur tête Clémenceau, Raymond Poincaré, suivit des maréchaux Foch et Pétain, ainsi que des représentants des Alliés, les généraux Haig et Pershing, entreprirent un voyage officiel pour marquer la victoire et le recouvrement des territoires jusque-là annexés, les cheminant de Metz à Strasbourg, puis Colmar et Mulhouse[1237]. La foule en liesse accueillit les libérateurs, pleine d'espérance pour un avenir nouveau, radieux, dans un éblouissement tricolore. Gouraud mit fin au préalable à Strasbourg au mouvement éphémère, embryonnaire et révolutionnaire, du *Räterepublik Elsaß-Lothringen*. En quinze jour, la déferlante « bleu horizon » semblât avoir balayer plus de deux générations de présence et de régime allemand. Mais ces apparences n'étaient qu'illusion car en Alsace-Lorraine, plus qu'ailleurs sur le front, l'après-guerre allait s'avérer bien plus complexe à solutionner que le temps de guerre.

Les Français réinvestirent l'Alsace-Lorraine d'abord militairement par l'Armée puis par une administration transitoire civile parachutée depuis Paris. L'équipe constituée autour de Clemenceau fit le choix de l'assimilation rapide[1238], galvaudé par la liesse tricolore de novembre, en s'écartant ainsi des recommandations issues de la Conférence d'Alsace-Lorraine réunie pour la première fois en 1915, afin de préparer le retour futur des provinces perdues sous le giron de la France, qui prônait la recherche d'une équilibre entre la centralisation étatique et le particularisme régional. Les anciens territoires annexés retournèrent à la France en conservant un régime juridique particulier. Dès le 15 novembre 1918, un décret (sur l'organisation des pouvoirs en Alsace-Lorraine) confia l'administration préfectorale à trois Commissaires de la République. Une administration temporaire fut ainsi mise en place, avec à sa tête depuis Strasbourg le Haut-Commissariat de la République (Georges Maringer, conseiller d'État en service extraordinaire[1239]), épaulé par deux Commissaires depuis les deux autres départements des anciens territoires annexés, l'un à Metz (Léon Mirman[1240]) (département de la Moselle), le second à Colmar (Henry Poulet[1241]) (département du Haut-Rhin).

Mais les services et organes de décision restèrent encore à Paris et le Haut-Commissaire se contenta d'assurer la transmission des consignes entre le Sous-Secrétaire d'État et les Commissaires de la République nommés.

[1237] René Weiss, Chef du Cabinet du Président du Conseil Munipal de Paris, op. cit.

[1238] Schmauch, J. (2013). « *Novembre 1918. L'Alsace et la Grande Guerre. Le retour à la France. L'administration française s'établit en Alsace-Lorraine ». Revue d'Alsace* n°139. p. 259.

[1239] Et beau-frère de Jules Jeanneney et proche de Clemenceau.

[1240] Précédemment « Préfet de guerre » à Nancy.

[1241] Précédemment à la tête de l'administration de la vallée de Thann libérée.

Entre l'armistice de novembre 1918 et le 1er novembre 1919 pouvoir civil et militaire coexistèrent en Alsace-Lorraine libérée[1242] mais encore considérée en état de siège. Le gouvernement militaire de Metz fut confié au Général Louis Ernest Maud'Huy[1243], celui de Strasbourg fut attribué au général mosellan Auguste Édouard Hirschauer. « *Le régime de l'état de siège confère à l'Armée des pouvoirs exceptionnels en matière d'ordre public, de police, de justice et de contrôle postale*[1244] ». Des conflits d'attributions et des dissonances surgirent alors entre l'autorité civile du Haut-Commissariat, le gouvernorat militaire et les généraux des armées occupant le TAL.

A la dispersion des pouvoirs entre autorités civiles et militaires s'ajouta l'interpénétration des législations nationales de droit français et celles, locales, héritées du régime allemand. En effet, les lois allemandes furent maintenues provisoirement, d'abord par un décret du 6 décembre 1918, puis par une loi du 17 octobre 1919, au terme de laquelle l'introduction du droit français ne pouvait se faire que par des lois spéciales ou, s'il y avait urgence, par décret soumis à la ratification du Parlement dans le délai d'un mois[1245].

L'administration mise en place dans le TAL par Clémenceau était faite de fonctionnaires français dépêchés sur place, méconnaissant les spécificités culturelles et linguistiques locales (usage de l'Allemand et des dialectes germaniques et romans). Les administrations centrales ignoraient en effet à peu près tout de la question alsacienne-lorraine, ou du moins ne connaissaient guère ni la législation ni les coutumes et institutions locales. Marcel Nast écrivit en août 1920[1246], au sujet de cette administration « *Il est malheureusement trop vrai qu'au lendemain de l'armistice on a vu s'abattre sur l'Alsace-Lorraine, telle une nuée de sauterelles, un trop grand nombre de jeunes fonctionnaires, qui avaient fait la guerre dans les bureaux des ministères ou dans cette élégante maison parisienne que fut le Service général d'Alsace-Lorraine, et qui n'étaient peut-être pas très préparés à la grande tâche à laquelle ils s'étaient fait convier* », puis, faisant une analogie avec l'organisation d'opérations militaires « *La situation était analogue à celle d'un Etat-Major qui aurait prétendu diriger des opérations militaires, sans rien connaître du terrain où ces opérations devaient être poursuivies*[1247]».

Au cours de l'hiver 1918-1919, les Alsaciens-Lorrains commencèrent à demander des comptes en réaction à l'insolence des fonctionnaires venus de « l'intérieur », « parachutés » sur leur territoire et la désorganisation des services publics. Après 48 ans de présence et de régime allemand, la population d'Alsace-Lorraine déchanta, et fut progressivement traversée par un sentiment d'impuissance face aux décisions d'une administration incapable de comprendre et de relayer leurs attentes, qui semblât les déposséder dans l'absolu de l'avenir de leur territoire, alors que les Allemands avaient entrouvert avant 1914 des perspectives d'autonomie.

[1242] Roth, F. (2004). « Le retour des provinces perdues. La liquidation de la guerre ». In *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914-1918. Histoire et culture*. Sous la direction de Stéphane Audoin-Rouzeau et Jean-Jacques Becker. pp 1065.

[1243] Louis Ernest de Maud 'Huy était du 2 avril au 3 novembre 1915, à la tête de la VIIe Armée. Il se distingua lors de la première bataille de la Marne en 1914, puis durant la bataille du Linge à l'été 1915. Nommé gouverneur militaire de Metz au sortir de la guerre, Louis Ernest de Maud 'Huy fut élu député du Bloc national pour le département de la Moselle le 16 novembre 1919, siège qu'il conserva jusqu'à sa mort. En mai 1920, il fut nommé membre du comité directeur de la Ligue des patriotes présidée par Maurice Barrès.

[1244] Roth, F. (2004). « Le retour des provinces perdues. La liquidation de la guerre », op. cit. pp 1066.[1244]

[1245] Roth, F. (2019). *Alsace Lorraine. Histoire d'un pays perdu de 1870 à nous jour*. Textoe. Editions Tallandier. pp.36 – 37.

[1246] Bibliothèque nationale de France. Nast, M. (1920). Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Strasbourg. Auteur du texte. *Le Malaise Alsacien-Lorrain*. Paris Éditions G. Grès et Cie.

[1247] *Ibid.*

Les populations craignaient l'assimilation brutale. Le retour sous le giron français des territoires « désannexés » ne s'effectua-t-il pas *manu militari* sans considérer le droit des peuples à disposer d'eux-mêmes prôné par Wilson durant les négociations préliminaires aux conclusions de la Paix ?

L'éblouissement tricolore des premiers instants, cet élan chargé d'affect, laissa place à une déception amère des attentes, voire à une défiance de la population à l'égard de l'administration française. Ainsi, un malaise croissant se fit jour au sein de la société alsacienne et mosellane, plus accentué en Alsace qu'en Lorraine. Le « malaise alsacien-lorrain » s'installa rapidement à partir du printemps 1919 dans un climat de morosité. M. l'abbé Muller le déclara sans détour « *beaucoup ont cru qu'il suffisait de s'abandonner à la joie de se retrouver après quarante-sept ans de séparation, pour que toute question fût résolue. De là est né, en partie, le malaise alsacien-lorrain : réalistes et sentimentaux ne peuvent se comprendre que difficilement*[1248] ». La réalité du malaise grandissant est confirmée par les membres alsaciens et lorrains du Conseil supérieur d'Alsace et de Lorraine qui se réunit pour la première fois le 25 février 1919 à Paris. La vie politique reprit en Alsace-Lorraine sur ce terreau de mécontentement de désorganisation administrative, dont la presse francophone et germanophone fit l'écho. De multiples interventions auprès du Président de la République, Raymond Poincaré, firent ressortir les inconvénients et les dangers de la politique centralisatrice prônée par Jules Jeanneney[1249]. Le printemps 1919 fut marqué par la pénurie en fonctionnaires, contraints et forcés par l'entremise des circonstances à cumuler en Alsace-Lorraine plusieurs fonctions. Le gouvernement français devait donc revoir sa copie en ce qui concerne l'administration des territoires recouvrés d'Alsace-Lorraine.

[1248] Bibliothèque nationale de France. Nast, M. (1920). Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Strasbourg. Auteur du texte. Le Malaise Alsacien-Lorrain, p. 60. *op.cit.*

[1249] Sous-Secrétaire d'État à la Présidence du Conseil chargé des questions d'Alsace-Lorraine, d'orientation radical-socialiste proche de Clemenceau ; il possède une réputation de jacobin et d'anticlérical.

2.1.2 Réorganisation de l'administration française pour parer au malaise (1919 – 1925)

« *Les soldats avaient bien taillé. Aux administrateurs de recoudre*[1250] »

En mars 1919, la direction administrative du TAL quitta Paris pour Strasbourg, où, sous la direction directe du Haut-Commissaire, elle forma le Commissariat Général de la République. Georges Clemenceau confia le Haut-Commissariat d'Alsace-Lorraine à Alexandre Millerand (cf. Figure 182 ci-contre), l'un des chefs du Bloc national et surtout un haut-fonctionnaire impartial dans les affaires locales du TAL. Le Haut-Commissaire prit alors le titre de Commissaire Général de la République qui possédait les pleins pouvoirs législatifs (décret du 21 mars 1919) pour mener à bien son objectif de réadapter progressivement les trois départements à l'administration française. Il réunit dans ses mains tous les pouvoirs, y compris le pouvoir militaire et était assistée par des fonctionnaires connaissant parfaitement la langue allemande.

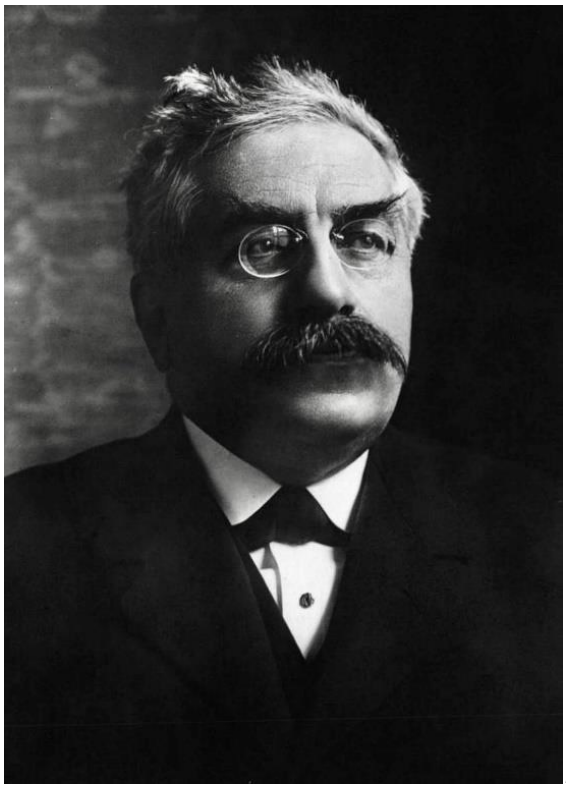


Figure 182 : Alexandre Millerand (en 1914). Commissaire Général de la République à Strasbourg de mars 1919 à janvier 1920[1251].

Millerand comptait réparer les erreurs commises dans l'immédiate sortie de guerre « *rassurer, conserver son champ de compétence et lutter contre les empiétements des ministères parisiens*[1252] ». Résidant sur place, il « *peut s'entourer d'Alsaciens et de Lorrains, choisis dans tous les milieux et dans tous les partis, qui lui donneront des avis éclairés et qu'il pourra toujours utilement consulter* »[1253].

Son Commissariat comprenait une direction des affaires militaires et une direction des affaires civiles et un service de presse et de propagande. La loi du 17 octobre 1919 redonna au parlement français le contrôle législatif, et permit aussi au gouvernement d'introduire la législation française par d'autres voies. Cette loi prévoyait que l'introduction du droit français ne pouvait se faire que par des lois spéciales. Le Commissaire Général de la République obtint ainsi des pouvoirs proches de ceux d'un ministre lui permettant de légiférer par décrets. Les lois allemandes persistèrent donc encore sous le couvert de la dénomination de « législation locale ».

[1250] Delahache, G. (1921). *Les Débuts de l'administration française en Alsace et en Lorraine, documents recueillis et publiés*, Coulommiers / Paris, Hachette.

[1251] Agence de presse Meurisse — ebay.com

[1252] Roth, F. (2004). « Le retour des provinces perdues. La liquidation de la guerre », op. cit. p.1067.

[1253] Nast, M. (1920). Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Strasbourg. Auteur du texte. *Le Malaise Alsacien-Lorrain*, *op. cit.* p.34.

L'espace militaire métropolitain fut réorganisé par le décret du 20 octobre 1919. Le versant lorrain du massif des Vosges (département des Vosges) fut rattaché à la 7e Région pour les Hautes-Vosges et à la 20e Région pour la partie des Vosges gréseuses septentrionales. Les départements de l'ancien *Reichsland* furent placés sous la tutelle militaire de la 21e Région. En dehors de quelques textes législatifs spéciaux, seul le droit pénal français et la procédure pénale française furent introduites en novembre 1919.

À la suite des élections législatives du 16 novembre 1919, dont le Bloc national s'avéra être le grand gagnant, et à diverses négociations entre Clemenceau et l'entourage de Millerand, ce dernier accepta de quitter Strasbourg pour succéder à Clemenceau comme président du Conseil. Millerand fut remplacé et quitta Strasbourg le 25 janvier 1920**.** Son successeur fut Gabriel Alapetite[1254] (cf. Figure 183 ci-contre). Dès juillet 1920, le budget de l'Alsace-Lorraine, qui était jusque-là autonome, fut soumis à la ratification du Parlement avant que ce vote soit purement et simplement supprimé. Le Commissaire Général ne possédait plus que des délégations de crédits détachés pour lui du budget propre à chaque ministère.

Figure 183 : Gabriel Alapetite vers 1900[1255].

Le Commissariat Général de la République prit fin avec la victoire du Cartel des gauches aux élections françaises du 11 mai 1924. Alapetite fut contraint à la démission en juillet 1924 et remplacé par Henri Cacaud, ancien secrétaire général, qui prit alors le titre de Commissaire Général Intermédiaire. L'introduction de la législation française en Alsace Lorraine fut soumise au droit commun par la loi du 24 juillet 1925, qui abolit les dispositions de celle du 17 octobre 1919.

La situation administrative entre 1919 et 1925 resta confuse du fait de l'imbrication des prérogatives et compétences des autorités civiles et militaires d'une part et l'application du droit français central et celle du droit local (dont un niveau communal de législations héritées de l'administration allemande) d'autre part. Les chevauchements réglementaires et les incohérences décisionnelles étaient inévitables. Tout se fit dans l'urgence et par tâtonnements.

C'est dans ce contexte si particulier qu'il convient à présent de lire et décrypter ce qui fut entrepris ou non pour débarrasser le TAL des munitions et REG abandonnés en masse lors du départ prématuré des Allemands fin 1918.

[1254] Simple haut fonctionnaire ne possédant que peu d'appui à Paris. Il a été ambassadeur de France à Madrid de 1918 à 1920.

[1255] Auteur inconnu — Régine Escallier. https://fr.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Alapetite.

2.2. LES SURPLUS DE MUNITIONS EX-ALLEMANDES DELAISSES SUR LE TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE (RAPPEL)

Sur le TAL, munitions françaises et allemandes étaient présentes au moment de l'armistice. Les Alliés, à la demande du GQG, n'y pénétrèrent pas et n'y laissèrent donc aucun reste de guerre. Les armées allemandes et françaises y abandonnèrent des matériels et matières explosibles à la cessation des hostilités, sur les anciens champs de bataille des Hautes Vosges et du Sundgau, ainsi que dans des dépôts en montagne, en retrait par rapport au front, ou encore, côté allemand, dans la plaine d'Alsace.

Les Français, en récupérant les anciens territoires annexés, mirent aussi la main sur des matériels abandonnés par les Allemands, laissés intacts, conformément au point IV de l'armistice du 11 novembre 1918. Ces matériels de guerre initialement propriété d'Etat allemand devaient être cédés tels quels aux Français.

Une liste des dépôts de munitions présents sur le sol d'Alsace-Lorraine au début 1919, établie en date du 11 octobre 1921, fait état de 32 dépôts en Alsace totalisant 19 000 tonnes et de 17 dépôts mosellans renfermant 14 000 tonnes, soit, à l'échelle du TAL, 33 000 tonnes répartis dans presque 50 dépôts (cf. Section 6h du présent manuscrit).

Ces dépôts devaient renfermer des munitions et autres matériels de guerre typiques de la fin de la Grande Guerre sur le Front occidental, avec parmi eux, une proportion inconnue mais possiblement non négligeable de projectiles à chargement chimique.

Leur présence est avérée au regard des archives consultées dans les grands dépôts ex-allemands de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*), au nord-est de Mulhouse dans le Haut-Rhin, mais aussi possiblement dans le dépôt dit « du Bois de Lorraine », situé aux confins des actuels départements de la Moselle et du Bas-Rhin (secteur de Schopperten, Keskastel), et dans le dépôt mosellan du Bois de l'Hôpital au sud-est de Metz. Un autre dépôt de rassemblement majeur avait été constitué sur l'ancien dépôt mais aussi usine de chargement ex-allemande de munitions du MA3 (*Munitionsanstallt 3*) en forêt d'Illkirch au sud de Strasbourg (cf. Section 6h du présent manuscrit).

2.3. ENJEUX ET MOTIVATIONS DU DESOBUSAGE DU TERRITOIRE D'ALSACE-LORRAINE

2.3.1 Singularités historiques et géographique d'un territoire recouvré à désobuser

Contrairement aux autres régions militaires de l'ancien front occidental, les combats d'artillerie n'intéressèrent en Alsace-Lorraine que des zones d'étendue relativement restreintes, pour l'essentiel circonscrites au versant alsacien du massif des Vosges[1256] et dans le sud de l'actuel département du Haut-Rhin (pays du Sundgau[1257]) entre les Vosges et la frontière franco-suisse (point 0 du front à Vieux-Ferrette). La particularité des anciens champs de bataille d'Alsace comparativement aux autres secteurs du front occidental est de s'inscrire dans un environnement montagneux, relativement difficiles d'accès. Trois secteurs furent particulièrement marqués par les évènements militaires violents de la Grande Guerre, notamment ceux de 1915. Il s'agit du nord au sud, (i) du secteur de la haute vallée de la Fecht (englobant les régions de Munster, du Reichackerkopf, du Linge et de la Tête des Faux), (ii) du secteur de l'Hartmannswillerkopf et (iii) du secteur d'Altkirch (dans le Sundgau). Le secteur d'Ammerzweiller dans le Sundgau connut un épisode paroxystique de combat en 1915 par la volonté d'user d'une tactique interarmes combinant attaques en surface, par l'infanterie, soutenue par l'artillerie, et attaques souterraines par les mines. Il s'agit du site de la guerre des mines le plus méridional du front occidental.

Les principaux combats entre Français et Allemands en Haute-Alsace se déroulèrent à l'été 1915, à l'initiative des Français pour la possession des hauteurs stratégiques dominantes, des positions sur les crêtes pour une attaque future dans la plaine d'Alsace. Les Etat-major s'acharnèrent et s'obstinèrent ainsi sur les hauteurs du Reichackerkopf, du Lingekopf, de la Tête des Faux, du Hartmannswillerkopf ou encore du Sudelkopf. 1915 resta l'année meurtrière. L'attaque future de grande envergure n'eut pas lieu.

Le quotidien sur cette portion du front après ces épisodes était fait d'escarmouches, d'échanges de tirs, de lutte contre l'ennemi commun qu'étaient le froid hivernal et l'ennui, le fermant de la vie du combattant sur ce « secteur calme du front » (cf. Figure 184 ci-contre).

Figure 184 : Tranchée allemande coffrée sur l'Ochsenfeld (commune d'Aspach-le-Haut) avec banquette de tir et créneaux. L'ennui et la lassitude sont manifestes. Non daté[1258].

[1256]On peut citer ici, en montagne les champs de bataille de l'Hartmannswillerkopf (ou « Viel-Armand »). du Lingekopf Reichsackerkopf, de la Tête des Faux et de la Tête des Immerling (Col du Calvaire), et en plaine, le secteur de Thann Cernay Steinbach.

[1257] Secteur d'Altkirch, d'Hirsingue et d'Ammerzweiller.

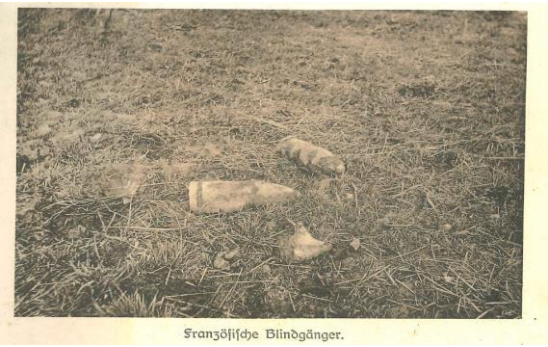
[1258] Photo R. Warth. Collection Philippe Springer. Extrait de Springer, P. (2008). *1914-1916. L'Alsace en guerre. Vers le front continu en Haute-Alsace*. Edition Coprur. p. 120.

Quant à la Moselle, après l'épisode de guerre de mouvement de la bataille des frontières en 1914 (bataille de Lagarde, de Sarrebourg, de Morhange, etc.), elle resta loin du front, formant les arrières lignes allemandes du front de Meurthe-et-Moselle et d'Alsace.

2.4. RELEVER LES RUINES, SECURISER LES LIEUX DE MEMOIRE SYMBOLIQUES ET PROTEGER LES POPULATIONS

A la fin des hostilités, les anciens champs de bataille de Haute-Alsace, situés dans des secteurs reculés, escarpés, difficiles d'accès, restèrent, un temps, ignorés, car la priorité était pour les autorités de concentrer l'effort dans la reconstruction des sols, la protection des populations, là où elles vivaient et où elles avaient été éprouvées, c'est-à-dire dans les vallées et la plaine d'Alsace. Là, comme partout ailleurs le long de l'ancien front occidental, l'enlèvement des engins de guerre non explosés s'imposa comme un prérequis incontournable dans la longue et complexe chronologie de la remise en état des sols (à des fins agricoles, industrielles, urbaines, etc.) et de la reconstruction.

La priorité donnée par l'armée à la reconstruction agricole et à la récupération de matières et matériels réutilisables était clairement et explicitement exprimée en Moselle (Territoire de Lorraine) dans les instructions émanant du GQG datée de fin 1918 et du début de l'année 1919. L'« *Instruction sur le service de récupération et reconstitution dans le territoire du commandement supérieur de Lorraine* », signé du Général de Maud 'Huy le 23 février 1919 fixait le cadre, et la mission assignée à l'Artillerie en matière de récupération, d'organisation des dépôts de munitions et de désobusage[1259]. Le territoire de Lorraine fut ainsi divisé en deux régions (i) la région de l'ancienne zone de combat et (ii) le reste du territoire de Lorraine, la première région étant placée sous la direction du Chef du service militaire de la récupération et de la reconstitution dans le Commandement Supérieur de Lorraine, la seconde sous la responsabilité de différents services pour la récupération des matériels dont ils possédaient les compétences. L'ancienne zone de combat fut elle-même subdivisée en trois sous-secteurs correspondant aux arrondissements de Metz, Château-Salins et de Sarrebourg par la note du GQG du 4 mars 1919. Les priorités des travaux étaient données aux « *terres les plus riches* » qui « *doivent être remises en état les premières »* puis on priorisa aussi *« les secteurs où il y a à récupérer les matériaux les plus précieux (où ceux dont le besoin est le plus urgent) doivent être nettoyés les premiers*[1260] ». Un programme de récupération ciblée fut défini et adressé au Commandant Supérieur du TAL visant ce double objectif, en définissant des degrés d'urgence pour éviter à tout prix « *l'éparpillement des moyens* ».



La question de la protection des populations civiles par rapport aux risques encourus au contact des engins de guerre abandonnés, épars (cf. Figure 185, ci-contre) ou en dépôts, n'apparaissait donc pas explicitement dans les préoccupations de l'autorité militaire en charge de la récupération et du désobusage au début de l'année 1919.

Figure 185 : Munitions françaises tirées et non éclatées affleurant en plein champs en Haute-Alsace vers 1915[1261]

[1259] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Instruction sur le service de récupération et reconstitution dans le territoire du commandement supérieur de Lorraine. Signé du Général de Maud 'Huy. 23 février 1919

[1260] *Ibid.*

[1261] Collection particulière D. Hubé.

C'est l'effort de reconstruction agricole qui fut privilégié avec le retrait des matériaux pour permettre la remise en culture le plus rapidement possible des terres les plus fertiles et la récupération des matériaux les plus utiles pour être réinjectés dans les circuits industriels et économiques. En Alsace-Lorraine, comme partout ailleurs dans le quart nord-est de la France concernés de près ou de loin par les combats de la Grande Guerre, l'Etat était responsable et garant de la sécurité des populations civiles, qui, se réappropriant leurs terres, étaient amenées à côtoyer des engins de guerre en puissance d'explosion qui leurs étaient souvent inconnus. Dans les zones habitées péri-urbaines et rurales, les engins de guerre abandonnés affleurant, directement accessibles en surface, étaient aussi source d'accidents qui « *sont légion depuis l'arrêt des combats. En hiver, les enfants mettent des détonateurs dans les fourneaux, qui éclatent. En automne, les socs de charrue heurtent des grenades et des obus qui explosent*[1262] ». Des accidents souvent mortels se produisirent en particulier au contact de grenades (facilement manipulables et aisées à armer) comme en janvier 1919 à Bitche (département de la Moselle) (cf. Figure 186, ci-dessous). Dans la grande majorité des cas, les dépôts de munitions abandonnés n'étaient pas gardés et donc laissés libres d'accès, en particulier des enfants, attirés par la curiosité et ces objets si insolites.

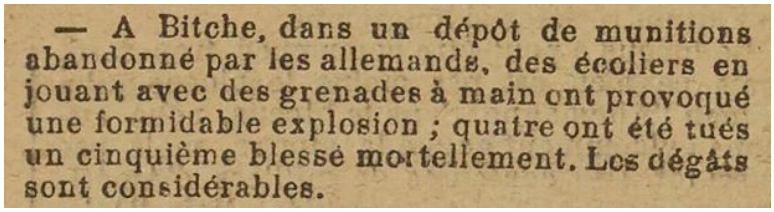

— A Bitche, dans un dépôt de munitions abandonné par les allemands, des écoliers en jouant avec des grenades à main ont provoqué une formidable explosion ; quatre ont été tués un cinquième blessé mortellement. Les dégâts sont considérables.

Figure 186 : Extrait du Journal de la Manche et de la Basse-Normandie du 4 janvier 1919[1263].

La sécurisation des anciens champs de bataille en Haute-Alsace devint par ailleurs un enjeu lorsqu'il a fallu promouvoir la fréquentation de masse des lieux dans le cadre du tourisme mémoriel. Particulièrement visés étaient les sites du Lingekopf et de l'Hartmannswillerkopf (où des mémoriaux devaient être construits) et les chemins y menant (cf. Figure 187). Ces chemins furent sécurisés par les personnels de l'Artillerie avec l'appui des bénévoles du Club Vosgien.

La reprise de l'exploitation forestière fut aussi source d'accidents dont la presse locale se fit largement écho dans l'entre-deux-guerres. Les bûcherons en forêt et les paysans sur les chaumes payèrent aussi un lourd tribut à 1914-1918. Comme le 21 décembre 1921 lorsqu'un bucheron fut tué à Soultzeren par l'explosion d'une grenade après avoir allumé un feu, ou encore le 13 juillet 1923 lorsque Martin Heinrich, 11 ans, gardant ses vaches marcha par inadvertance sur un détonateur qui fonctionna le blessant gravement.

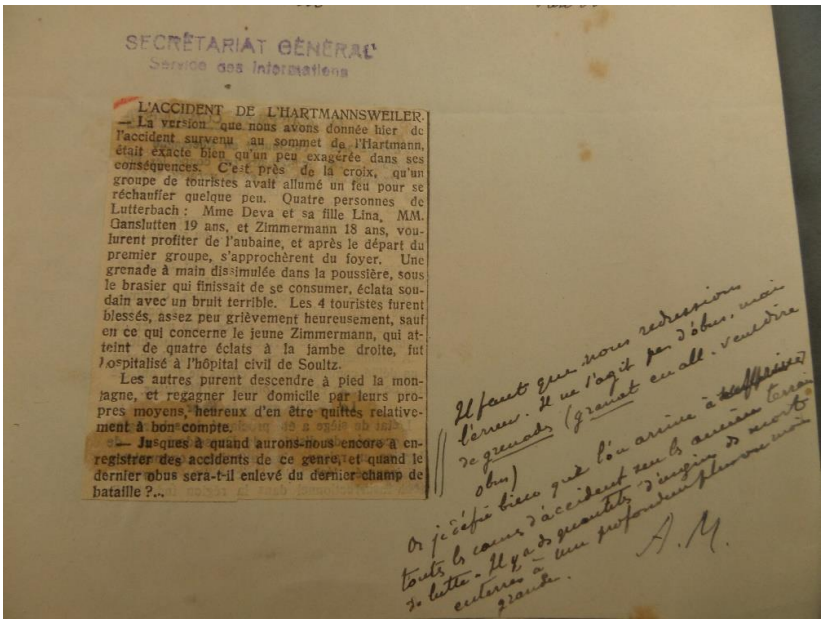
Figure 187 : Cimetière provisoire allemand, près du monument des Chasseurs. Document Comité du Monument national du Hartmannswillerkopf. Tourisme mémoriel dans les années 20 à l'Hartmannswillerkopf[1264].

[1262] [1262] Letouche, R. (2008). *Lorraine 1918. De l'armistice à la reconstruction*. Nancy, éditions de la Place Stanislas. pp.77-78.

[1263] Bibliothèque nationale de France. *Journal de la Manche et de la Basse-Normandie*. 4 janvier 1919

[1264] https://www.lalsace.fr/defense-guerre-conflit/2023/11/04/grande-guerre-la-delicate-gestion-des-morts-au-hartmannswillerkopf

En avril 1921 à l'Hartmannswillerkopf (Croix du Silberloch) une grenade explosa suite à l'allumage d'« *un feu pour se réchauffer* » et blessa quatre touristes (cf. Figure 188 ci-dessous). Ces accidents rappelèrent aux politiques et décideurs l'urgence de libérer les sols des Restes Explosifs de Guerre abandonnés au terme de la Grande Guerre. Auguste Millerand annota le courrier qui lui fut adressé comportant la coupure de presse relatant l'accident de l'Hartmannswillerkopf (ci-dessous) « *il faut bien que l'on arrive à supprimer toutes les causes d'accidents sur les anciens terrains de lutte. Il y a des quantités d'engins de mort enterrés à une profondeur plus au moins grande* ».


SECRÉTARIAT GÉNÉRAL
Service des Informations

L'ACCIDENT DE L'HARTMANNSWEILER. — La version que nous avons donnée hier de l'accident survenu au sommet de l'Hartmann, était exacte bien qu'un peu exagérée dans ses conséquences. C'est près de la croix, qu'un groupe de touristes avait allumé un feu pour se réchauffer quelque peu. Quatre personnes de Lutterbach : Mme Deva et sa fille Lina, MM. Ganslutten 19 ans, et Zimmermann 18 ans, voulurent profiter de l'aubaine, et après le départ du premier groupe, s'approchèrent du foyer. Une grenade à main dissimulée dans la poussière, sous le brasier qui finissait de se consumer, éclata soudain avec un bruit terrible. Les 4 touristes furent blessés, assez peu grièvement heureusement, sauf en ce qui concerne le jeune Zimmermann, qui atteint de quatre éclats à la jambe droite, fut hospitalisé à l'hôpital civil de Soultz.

Les autres purent descendre à pied la montagne, et regagner leur domicile par leurs propres moyens, heureux d'en être quittés relativement à bon compte.

— Jusques à quand aurons-nous encore à enregistrer des accidents de ce genre, et quand le dernier obus sera-t-il enlevé du dernier champ de bataille ?...

Il faut que nous redoublions d'efforts. Il ne s'agit pas d'obus, mais de grenades (grenat en all. veut dire obus)
Or je crois bien que l'on arrive à supprimer toutes les causes d'accidents sur les anciens terrains de lutte. Il y a des quantités d'engins de mort enterrés à une profondeur plus ou moins grande.
A. M.

Figure 188 : Coupure de presse relatant l'accident survenu en avril 1921 à l'Hartmannswillerkopf, annotée par le Haut-Commissaire de la République, Alexandre Millerand[1265].

Faute de pouvoir nettoyer l'intégralité de ces sols bombardés et/ou accueillant des dépôts de munitions délaissés, une campagne de sensibilisation aux risques inhérents aux restes de guerre abandonnés par voie d'affichage (en français et en allemand) fut lancée pour inciter la population exposées (et en particulier les plus jeunes) à la plus grande vigilance.

3. Désobusage des anciens champs de bataille du Territoire d'Alsace-Lorraine

Comme nous l'avons vu à la Section 8h du présent manuscrit, la Direction de l'Artillerie ne considéra pas utile de recourir à des contrats avec des entrepreneurs privés pour faire effectuer les travaux de récupération et de désobusage du champ de bataille en Alsace et en Moselle. Des contrats furent toutefois effectivement conclus avec des entreprises privées mais pour des opérations spéciales d'échelle industrielle (la démolition de tonnages élevés de munitions des grands dépôts abandonnés sur le TAL par les Allemands) (cf. Section 7h du présent manuscrit). Cette tâche de nettoyage des champs de bataille fut dévolue et assurée directement par les Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR). Trois périodes peuvent être distinguées dans l'histoire du désobusage des anciens champs de batailles en Alsace-Lorraine.

[1265] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. L'accident de l'Hartmannsweiler. Coupure de presse annotée par le Haut-Commissaire de la République, Alexandre Millerand. Non daté.

3.1. PREMIERE PERIODE. DESOBUSAGE PRECOCE (NOVEMBRE 1918 – OCTOBRE 1919)

3.1.1 Le rassemblement des munitions en bon état pour une utilisation ultérieure. Mais laquelle ?

Les instructions des notes du 28 novembre 1918 du GQG (qui précisa le but des principales opérations de récupération des restes de guerre) et celle sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918 furent complétées par celles de la note du 19 janvier 1919 visant plus particulièrement les engins ex-allemands délaissés sur le territoire anciennement annexés d'Alsace-Lorraine. Le désobusage et les opérations de récupérations furent organisés en 1919 sur le Territoire de Lorraine en suivant les instructions émanant du GQG datée de fin 1918 et du début de l'année 1919 et notamment l'« *Instruction sur le service de récupération et reconstitution dans le territoire du commandement supérieur de Lorraine* », signé du Général de Maud 'Huy le 23 février 1919. Les consignes étaient « *Les munitions […] en bon état seront rassemblées, classées par catégories, et conservées en vue d'une utilisation éventuelle*[1266] ».

L'armée y appliqua la même logique qu'ailleurs, dans les autres régions militaires anciennement concernées par les combats de la Grande Guerre, mais en y associant une finalité qui n'est explicitée dans aucune autre note par ailleurs, celle d'un usage ultérieur des engins. Des projectiles dont l'Etat-Major prévoyait ainsi « *l'emploi dans un avenir prochain »* étaient donc destinés à être réservés. Il s'agissait des munitions en bon état et entreposées dans de bonnes conditions de sécurité et de conservation. Les archives ne précisent pas explicitement à quel(s) usage(s) ces projectiles étaient destinés. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées au regard du contexte politique et militaire de l'entre-deux-guerres en Alsace-Lorraine.

L'hypothèse la plus probable se déduit d'un corpus d'archives issu des fonds du Service Historique de la Défense, site de Vincenness, sous la cote GR9 NN 3-675. L'armée française entrant en Alsace-Lorraine en novembre 1918 reprit possession du territoire et s'empara aussi des installations militaires ex-allemands, dont les fortifications permanentes allemandes (*Festen*). Ces places auraient été rénovées par les Allemands sur instruction de Ludendorff au moment où fin 1918, les Allemands envisagèrent de défendre leurs frontières acquises en 1871[1267]. Elles étaient dotées de pièces d'artillerie (de fortification) ne pouvant tirer que des projectiles répondant aux standards (calibres) allemands. L'Alsace-Lorraine, étant redevenue un territoire frontalier aux marches de l'Allemagne, dut être défendue et se montrer menaçante face à une Allemagne vaincue mais qui tarda à s'acquitter de ses obligations de dédommagement de guerre selon les termes du Traité de Versailles. Les *Festen* ex-allemandes équipées de pièces et munitions ex-allemandes avaient donc intégrées le dispositif militaire français en Alsace-Lorraine face à l'Allemagne. Plus tard, dans les années 30, ces places fortes furent intégrées à la ligne Maginot. Ces archives datant de 1933[1268] montrent que les engins ex-allemands de la Grande Guerre furent bien en partie conservés par les Français en Alsace-Lorraine.

[1266] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note. Au GQG, le 19 janvier 1919. Pour le général commandant en chef et par son ordre. Le général IGA. Signé : Herr.

[1267] Général Ludendorff. Premier quartier-maître général des armées allemandes. *Souvenir de guerre. Tome II*. Traduction française intégrale et définitive, avec une préface du Général Buat, ex-Chef d'Etat-Major général de l'Armée. Payot, Paris, 1932.

[1268]Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN3-675. Réfection des munitions ex-allemandes stockées dans les places de Metz, Thionville et Strasbourg. 2e rapport de mission du capitaine Grangier de l'École de pyrotechnie, 18 mai 1933.

Les engins français furent aussi réservés en Alsace-Lorraine pour doter l'armée du Rhin qui occupait la rive gauche du Rhin et une tête de pont en Hesse en rive droite du fleuve (cf. Section 10h du présent manuscrit).

Une autre hypothèse est celle de munitions réservées pour être cédées aux pays en guerre, à l'est, contre la déferlante rouge bolchevique, suite au redécoupage de l'ex Empire de Russie et aux aspirations indépendantistes, et que la France soutenait directement ou indirectement sur le plan militaire. Le courrier du général de Division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz, Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine à l'attention du Commissaire Général de la République, à Strasbourg (Gabriel Alapetite). daté du 6 avril 1920 est éclairant « *J'estime qu'il serait nécessaire de détruire, le plus tôt possible, toutes les munitions dont on ne prévoit pas l'emploi dans un avenir prochain (cession aux Polonais, Tchequo-slovaques [1269]).* La France participa en effet entre avril 1919 et l'été 1920 à la renaissance de la Pologne, suite à l'invasion de la Pologne par l'Armée Rouge. Entre avril 1919 et juin 1919 les volontaires français participèrent à la réorganisation de l'Armée Haller avec laquelle ils partirent pour la Pologne, au sein d'une mission militaire sous le commandement du général Henrys (avec parmi les officiers, Charles de Gaulle). Les Français participèrent directement aux opérations militaires. Les forces tchécoslovaques dirigées à partir de juin 1919 par le général français Maurice Pelle furent également engagées dans une guerre contre l'Armée Rouge hongroise pour la suprématie sur la Slovaquie[1270].

En Moselle, après récupération et triage, tous les matériels furent versés dans des dépôts dits « de rassemblement » qui étaient, pour les munitions et le matériel d'artillerie ceux du Bois de Daumont, de Delme, d'Avricourt, de Château-Salins, d'Hampont, de Dieuze, de Maizières [-les-Vic], d'Azoudange, de Réchicourt-le-Château et de Lorquin (soit 11 dépôts) auxquels se rajoutent les trois dépôts dédiés aux matériels du génie (Gondrexange, Hampont et Delme).

3.1.2 Premières destructions de munitions à rebuter sur les anciens champs de bataille

Les premières destructions de munitions furent alors réalisées par les militaires durant la phase de récupération ; étaient concernées celles indiquées dans la note du GQG n°8039 du 10 décembre 1918. Il s'agissait d'engins intransportables et/ou de conservation douteuse, avec en particulier des engins qui se dépréciaient rapidement, devenaient instables et détonaient aisément : les grenades et projectiles de l'artillerie de tranchée[1271] chargés d'explosifs (per)chlorates (côté français) et des chargements de piètre qualité (côté allemand).

Jusqu'à octobre 1919, les opérations de désobusage furent effectuées en Alsace sous les ordres du Général Commandant de l'Artillerie du Territoire d'Alsace (GCATA) (il s'agissait du général Fetter) et des Commandants des Corps d'Armée stationnés sur le Territoire (VIIe et XXIe Corps). Les archives relatant ces opérations manquent ou sont parcellaires. Des traces écrites subsistent localement dans les histoires régimentaires décrites dans les JMO ; c'est ainsi qu'au Linge, il semble que le désobusage précoce entreprit par les militaires encore stationnés sur place se soit déroulé entre le 11 et le 17 novembre 1918, date de la mise en route du 327e Régiment d'Infanterie à destination de Turkheim et d'Ingersheim[1272].

[1269] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Général de Division Berthelot. Gouverneur Militaire de Metz. Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République. Strasbourg. Metz, le 6 avril 1920.

[1270] *A l'Est. La Guerre sans fin. 1918-1923*. Sous la direction de François Lagrage, Christophe Bertrand, Carine Lachèvre et Emmanuel Ranvoisy. Gallimard / Musée de l'Armée. 2018.

[1271] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'escadron Salvaire Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, 1er Section. Avril 1921.

[1272] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 26 N 751 /8.

Les marcheurs bénévoles passionnés du Club Vosgien s'associèrent aux militaires pour faire ouvrir dans les terres dévastées et constellées de matériel, ferrailles et munitions, des chemins, des corridors sécurisés pour donner accès aux « touristes » les lieux de mémoire. Les zones, sanctuarisées, confiées après-guerre à l'Administration des Beaux-Arts, ont été débarrassées des projectiles apparents mais laissées en l'Etat sans recherche en profondeur des engins enfouis.

3.1.3 Démolitions par pétardement des dépôts ex-allemands

Les opérations de destruction de munitions sur le TAL dans l'immédiat après-guerre ne générèrent pas de sources archivistiques permettant de rendre compte de l'ampleur et des modalités des opérations effectuées. Les sources relatant ces activités militaires sont quasiment inexistantes. Un an s'écoula depuis l'armistice sans que les dépôts ne suscitèrent un intérêt particulier auprès des populations et des autorités civiles comme militaires si on se base sur l'absence d'enregistrements et d'archives ayant trait à la situation de ces dépôts entre novembre 1918 et novembre 1919. Le premier signe d'inquiétude relatif aux dépôts concerna celui du Bois de Lorraine émanant du sous-préfet du Bas-Rhin (à Saverne), par un courrier de décembre 1919, suivi par un second de la même teneur, daté du 29 janvier 1920.

Deux documents conservés aux archives départementales du Bas-Rhin à Strasbourg (cote 121 AL 402), attestent que des démolitions furent bien effectuées sur le TAL par les autorités militaires. Le premier qui recense, en date d'octobre 1919, les principaux dépôts de munitions ex-allemands abandonnés sur le territoire de la Moselle (au nombre de 31, à l'exclusion des dépôts du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine), fait état de 24 terrains d'explosion (TE) associés à ces dépôts[1273]. Ces démolitions furent opérées par pétardement dans des entonnoirs d'éclatement de terrain d'explosion au plus près des dépôts à neutraliser. Ces terrains d'explosion peuvent être identifiés sur des photographies aériennes anciennes lorsqu'ils marquèrent significativement la topographie et qu'ils furent survolés par au moins une mission photographique aérienne avant que les entonnoirs d'éclatement n'aient été remblayés et nivelés. Ces terrains d'explosion étaient sommairement localisés dans le document d'archive avec différents niveaux de précision (de la commune au lieudit).

Parmi les dépôts de munitions identifiés par l'Armée en octobre 1919, certains étaient associés à cette date à un terrain d'explosion dont seuls six ont pu être géolocalisés par photographies aériennes. Il s'agit des deux TE de Xouaxange[1274] / « Haut-de-Lorquin » (cliché IGN, mission 1935), le TE du « Rizontal » à Hérival-Puttigny (site du canon *Gros Max*[1275] de Hampont) (cliché IGN, mission 1935), Boulay-Moselle (cliché IGN, mission 1935), Lucy (cliché IGN, mission 1935), et Xocourt (cliché IGN, mission 1935). Ces terrains de destruction ne sont actuellement plus visibles dans le paysage, ayant été remblayés puis nivelés.

[1273] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Liste des dépôts de munitions évacués en 1918 et 1919 et non compris dans les travaux dont le maintien provisoire a été demandé par le Parc d'Artillerie Régional de Metz. Metz, le 3 janvier 1922. P.O. le Chef d'escadron. Signé : illisible.

[1274] Se prononce Soiquesange.

[1275] Pièce d'artillerie de marine allemande de 380 mm SLK (« *Sehr Lange Kanone* » Long Max) ayant bombardé Nancy et ses environs, Dombasle et Lunéville entre le 1er janvier 1916 et février 1917. Gaber, S. (1998). *Mémoire de la Grande Guerre en Lorraine*. Editions Serpenoise. 1998.

3.1.4 Le centre de destruction de la forêt de Wintzenheim

Un second ensemble de documents conservés aux archives départementales du Bas-Rhin (site de Strasbourg, cote 121 AL 402) fait aussi état de démolitions opérées par l'Armée dans le Haut-Rhin en 1919. L'Armée (le 85e Régiment d'Artillerie de Lourdes) exploita en mai 1919 un terrain de destruction de munitions par éclatement, dans la forêt de Wintzenheim (dans la vallée de la Fecht, à 10 km au sud-ouest de Colmar dans le Haut-Rhin) « *Les munitions à détruire étaient réunies dans les fosses d'explosion par caisses nombreuses ou en gros amas*[1276] ». Ces engins provenaient des dépôts de munitions allemands de Soultzbach et de la proche vallée de Munster. Lors des destructions opérées le 20 mai 1919, au moins 4 000 obus et 380 grenades sphériques furent éliminés[1277].

Ce dépôt de munitions renfermait de grandes quantités de projectiles de tranchées explosifs allemands *Taube*[1278] pré-fragmentés du lance-grenade léger *Kleiner Priester* [1279] (cf. Figure 189). Ces engins étaient réputés très solides et se brisaient avec difficultés par détonation lors du pétardement, durant lequel les projectiles s'enfonçaient dans les sols des entonnoirs et/ou étaient projetés par-dessus les lèvres des entonnoirs[1280].

L'Armée engagea ces destructions en ne sollicitant pour autorisation ni les populations civiles concernées (propriétaires fonciers, exploitants forestiers, etc.) ni les instances civiles des Eaux & Forêts. Les sols forestiers furent bouleversés par les explosions qui projetèrent également au-delà du chantier de nombreux éclats et des engins non explosés qui vinrent constellerles terrains alentours. Par ailleurs, des incendies se déclarèrent, causant l'éclatement des engins épars, et entravant fortement par-là l'intervention des secours et des pompiers. Les fûts des arbres proches du chantier de désobusage furent criblés d'éclats. Les explosions successives creusèrent sept grands entonnoirs de dix mètres de diamètre pour cinq de profondeur, dont les sols, chargés de ferraille, éclats, étaient calcinés.

Ces dégâts amenèrent l'Inspection des Eaux & Forêts à dresser un procès-verbal, listant les dommages et estimant le montant du dédommagement : pertes directes par l'anéantissement d'un perchis complet de sapins, dépréciation de la valeur du bois mitraillé, perte de fertilité du sol. A ces coûts, s'ajoutèrent ceux de la remise en état : comblement des cratères et reboisement.

[1276] Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402. Courrier du 20 octobre 1928 de la Direction du Service des Dommages de Guerre et de la Reconstitution à Monsieur le Mr le Chef de Bataillon Hurst, Commissariat Général de la République à Strasbourg.

[1277] Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Maturier commandant la 4e Batterie du 85e Régiment d'Artillerie Lourde à Monsieur le Commandant le 85e RAL.

[1278] Littéralement « tourterelle », produisant à la détonation des 225 gr d'explosifs 96 éclats (Belot, H. communication personnelle).

[1279] Littéralement « petit curé », *Granatenwerfer 16*.

[1280] Communication orale, Service du Déminage.

Figure 189 : Projectile pré-fragmenté du lance-grenade léger allemand Kleiner Priester non éclaté et projeté au-dessus des lèvres d'un entonnoir de destruction à Barenton-Bugny, au nord-est de Laon (département de l'Aisne)[1281].

C'est plus tard, le 9 octobre 1923, que le site fit malheureusement reparler de lui. Six bûcherons allumèrent un feu pour prendre un petit déjeuner quand une grenade du genre *Würfmine*[1282], dissimulée sous les feuilles, fit explosion tuant trois d'entre eux[1283] et blessant les trois autres[1284]. Dans un rayon de huit mètres autour du lieu de l'accident, la Gendarmerie découvrit trois autres de ces engins et une grenade à ailettes. L'ancien champ d'explosion était pourtant situé à 100 mètres de là. Les engins avaient été projetés lors du pétardement de masse.

Terrible explosion à Walbach

Deux morts, quatre blessés

Notre petite commune, située dans la charmante vallée de Munster, a été le théâtre d'un terrible accident.

A proximité de la maison forestière d'Aspach et du champ de tir du même nom, deux groupes d'ouvriers étaient occupés à couper des arbres. Il était environ neuf heures du matin lorsque l'un des groupes se réunit pour préparer son déjeuner.

Dans un sentier de la forêt, les ouvriers allumèrent un feu pour se chauffer. Le garde-forestier Schirmer, qui avait désigné les arbres devant être abattus, s'associa au groupe et causa avec les ouvriers. Au bout de quelques minutes, une légère pluie commença à tomber. Pour s'abriter, on sorta des brandons enflammés sous un arbre; tout le monde se groupa autour du feu et prit le petit déjeuner. A un moment la conversation tomba sur les obus qui, depuis la guerre, sont restés dispersés dans la forêt, comme si les malheureux avaient pressenti la mort qui les guettait.

Le déjeuner était terminé et le forestier avait déjà quitté ses ouvriers en leur disant : « Au revoir et travaillez bien ! », lorsque, subitement, une terrible détonation projeta tout le monde par terre. M. Schirmer retourna immédiatement vers le groupe d'ouvriers qu'il trouva dans un état lamentable. Les uns, les vêtements en lambeaux, baignaient dans leur sang et poussaient des cris déchirants. Le garde forestier lui-même était blessé à la jambe.

Un obus, caché dans l'herbe à proximité de l'endroit où le feu avait été allumé, avait fait explosion. Un hasard tragique voulut que, juste à cette place où les ouvriers se reposaient, fût caché l'engin mortel.

Les ouvriers du deuxième groupe accoururent immédiatement et portèrent secours à leurs malheureux camarades. M. Schirmer, garde-forestier envoya immédiatement un des hommes qui n'avait pas été touché, à la forge pour demander du secours à Wintzenheim et à Colmar. Lui-même, appuyé sur deux ouvriers, se traîna à la maison pour se faire panser.

Bientôt, MM. Woelflin et Gerizg arrivèrent sur les lieux de l'accident et portèrent secours aux blessés. Des soldats de la C. M. I du 152ème R. I., qui se trouvaient à proximité, accoururent également et, sous la direction du capitaine Berret, prodiguèrent leurs soins aux pauvres mutilés. L'un de ceux-ci, Schwartz Henri, expira au moment même où on lui mettait son pansement.

Quelque temps après, M. Meyer, maire de Wintzenheim et conseiller général; le Dr. Pflimlin, trois gendarmes et les gardes champêtres Birgy, Meyer et Herrmann, arrivèrent. Le Dr. Pflimlin donna les premiers secours médicaux aux blessés et organisa leur transfert immédiat à l'hôpital civil de Colmar. L'auto sanitaire qui bien vite s'était transportée sur les lieux de l'accident, les ramena aussitôt.

Le cadavre du malheureux Schwartz fut transporté sur une civière ornée de branches de sapin à Wintzenheim, son pays natal. Schwartz, qui n'avait que 28 ans, était marié et père d'un enfant.

La deuxième victime est Joseph Schuler, célibataire et âgé de 25 ans. Il était domicilié à Hausseren; le malheureux était horriblement mutilé, ayant les deux jambes fracturées et une cuisse littéralement déchiquetée. En outre, il avait de nombreuses et terribles blessures aux bras, à la figure et sur tout le corps. Dès son arrivée à l'hospice civil de Colmar, les derniers Sacrements lui furent administrés. Quelques instants après, il était mort.

Trois autres ouvriers, domiciliés à Hausseren, ont été blessés. Ce sont : Eugène Klapper, célibataire, dont les blessures sont graves et mettent sa vie en danger. Les deux autres blessés sont moins grièvement atteints. M. Sonnelitter a perdu trois doigts. Il est âgé de 27 ans, marié et père d'un enfant. M. Joseph Kirchhoffer a une fracture compliquée d'une jambe; il est âgé de 42 ans et père de trois enfants.

L'émotion causée par ce terrible accident est très vive à Walbach et dans toute la région.

Figure 190 : Extrait du Le Nouvelliste d'Alsace du 10 octobre 1923[1285].

[1281] Hubé, D. (2023).

[1282] Projectile de mortier allemand.

[1283] Klopfer Eugène, né le 14.12.1892 à Husseren, Schwarz Henri, né le 19.6.1895 à Husseren, Schuller Joseph, né le 10.9.1898 à Husseren.

[1284] Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Ruffier, Commandant de Gendarmerie de l'Arrondissement de Colmar du 11 octobre 1923.

[1285] Bibliothèque nationale de France. *Le Nouvelliste d'Alsace* du 10 octobre 1923.

Une croix se dresse aujourd'hui à l'emplacement de l'accident qui donna son nom au lieudit « *La Croix des Bucherons* ».

3.1.5 Tonnage démoli

Les tonnages réellement démolis par les militaires en 1918 et 1919 sur le TAL reste inconnu faute de sources suffisamment précises pour pouvoir l'estimer. Des données approximatives existent pour le TA. En 1919, les corps d'armée stationnés sur le TA auraient démoli « *un tonnage qui ne peut être évalué faute de renseignements, mais qui paraît devoir être assez important*[1286] ».

3.2. SECONDE PERIODE (NOVEMBRE 1919-AVRIL 1921)

3.2.1 Désobuser, mais avec quelle main d'œuvre ?

La seconde période s'ouvrit en octobre 1919. En Alsace-Lorraine comme partout ailleurs sur les anciennes lignes de front de la Grande Guerre, le désobusage était nécessaire, mais restait à savoir qui, des instances militaires et/ou civiles, devait s'en charger. A l'automne 1919, des discussions s'engagèrent entre la direction du Service Central des Dommages de Guerre et de la Reconstitution, le Commissaire Général, le commandement de l'Artillerie et la préfecture du Haut-Rhin, principal département du TAL concerné par les combats de 1914-1918 et le désobusage.

Il semblerait que sur cette période, le désobusage dans le TAL ait été opéré par l'Artillerie aidée par des artificiers civils.

Le 28 octobre 1919, le directeur du Service des Dommages de Guerre fit connaître au général Fetter que pour les besoins du désobusage, il mettait à disposition trois équipes d'artificiers militaires complétées par des artificiers civils, avec un personnel progressivement augmenté jusqu'en mai 1920, mais ensuite réduit par suite du renvoi de la classe 1918 (démobilisation). En juin 1920, le Commissaire Général porta à connaissance du préfet du Haut-Rhin que le CGATA avait informé le directeur du Service Central des Dommages de Guerre et de la Reconstitution du remplacement des artificiers militaires par des civils. Le préfet s'y opposa (arguant que les artificiers civils n'offraient ni les mêmes compétences, ni les mêmes garanties de sécurité que leurs homologues militaires) et exprima son souhait que « *il semblerait rationnel que le CGATA, y conservât sa participation et aussi sa part de responsabilité* » arguant que les militaires étaient les plus aguerris aux démolitions des munitions. La demande du préfet resta lettre morte. Le PAPS rappela alors d'urgence le personnel militaire. Le préfet adressa alors une nouvelle lettre, datée du 9 octobre 1920, au Commissaire Général « *Dans ces conditions et en raison des inconvénients signalés dans ma lettre précitée que le Service des Dommages de Guerre et de la Reconstitution sera déchargé des travaux de nettoyage des champs de bataille qu'il ne peut plus assurer dans les conditions de sécurité nécessaires avec des manutentionnaires civils*[1287] ». Tout le personnel militaire fut rappelé le 14 octobre 1920 et les équipes civiles dissoutes (faute d'encadrement).

[1286] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'escadron Salvaire Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, *op. cit*.

[1287] *Ibid.*

Afin de compenser la réduction du personnel militaire et poursuivre / hâter les destructions, on demanda à pouvoir intégrer au sein des équipes de désobusage des artificiers civils et des travailleurs coloniaux. Le Général Commandant Supérieur sur le Territoire d'Alsace adressa une demande au Ministère de la Guerre pour l'envoi de travailleurs coloniaux (150) « *pour être employés aux travaux de manutention et de destruction de munitions* » à répartir entre les dépôts de Strasbourg, Neuf-Brisach, du camp d'Oberhoffen et Mützig[1288]. L'objectif était l'enlèvement des munitions françaises réservées dans divers dépôts du territoire d'Alsace. La demande de personnel fut refusée en février 1920. Pour compenser le Ministère de la Guerre « *autorise à embaucher les manutentionnaires civils prévus (…) mais seulement en ce qui concerne les manutentions nécessitées par le stockage, l'évaluation ou la destruction des munitions existant dans les dépôts français situés en dehors des villes de garnisons* ».

3.2.2 Opérations de rassemblement et de réorganisation des dépôts

Les munitions allemandes en bon état furent rassemblées par catégories et alloties régulièrement selon les règlements français en matière de sécurité et d'organisation des dépôts de munitions. On assista ainsi au Bois de Lorraine (à Keskastel et Schopperten[1289]) à des opérations de réallotissement des projectiles et de réorganisation du dépôt. En exécution de l'instruction provisoire du 7 février 1920, les dépôts de munitions furent ainsi organisés en plusieurs parcs « *de manière à rendre à peu près nulles les chances d'accidents (risques d'incendie ou de détonation) et assurer une sécurité relative du voisinage même en cas d'accident* [1290]» en stockant isolément d'une part les projectiles explosifs et d'autres part les engins à chargements spéciaux en îlots distants de 40 à 50 mètres (pour les explosifs), ou 30 à 40 m (pour les chimiques), dans des baraques n'excédant pas dix tonnes. Pourtant, ces dispositions ne surent éviter des accidents.

3.2.3 Tonnages détruits

En 1919 et 1920, avec ce personnel réduit, 1 950 tonnes de projectiles furent détruits[1291] sur le Territoire d'Alsace. Ce tonnage reste faible comparativement à celui des dépôts de munitions délaissés sur les sols du TAL par les armées (6%).

3.3. TROISIEME PERIODE (1921-1930)

3.3.1 Attribution du désobusage au Parc d'Artillerie de la Place de Strasbourg (PAPS)

Le 21 avril 1921, Strasbourg trancha sur le partage des rôles et responsabilités relatifs au désobusage. Ces opérations furent intégralement confiées aux services de l'Artillerie et il ne fut pas fait appel, comme dans les 1er, 2e et 6e Régions militaires, à des prestataires civils privés par voie contractuelle. Le Service des Dommages de Guerre et de la Reconstitution contribua toutefois au désobusage « *par le versement des salaires des employés civils, les primes de bon rendement et de danger, ainsi que les fournitures d'explosifs* ».

[1288] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Note pour la Direction –Service des Travailleurs Coloniaux – Paris. Direction de l'Artillerie. P. le Ministre et P.O. Le Général Directeur de l'Artillerie P.O. AL le Chef du 2e Bureau : signé : Gotier.

[1289] Dans le département du Bas-Rhin, mais frontalier avec celui de la Moselle (territoire de Lorraine). La gestion de ce dépôt dépendait du Parc d'Artillerie Régional de Metz.

[1290] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Lieutenant-Colonel Chardon, Commandant le Parc d'Artillerie de la Place de Metz à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine à Metz. Metz, le 21 avril 1921. Signé : illisible.

[1291] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire, Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, *op. cit.*

Le 20 juin 1921, les autorités civiles et militaires s'entendirent pour confier la direction « *de la destruction des munitions dans les anciennes zones de bataille* » à Monsieur le Chef d'Escadron Commandant le PAPS. Les opérations de désobusage dans la circonscription de Mulhouse furent confiées au commandement du VIIe Corps d'Armée, celles dans la circonscription de Colmar au commandement du XXIe Corps d'Armée.

3.3.2 Opérations réalisées

Etaient prioritairement visées par le désobusage, les zones péri-urbaines où eurent lieu les combats, puis dans un second temps, les secteurs boisés particulièrement concernés par l'ancien front. Les équipes de désobusage éliminèrent d'abord les engins affleurant à la surface du sol, puis ceux exhumés à la faveur de travaux de terrassement ou de déblaiement menés pour la remise en état des sols par le Service de la Reconstitution. Aucune recherche systématique des engins ne fut pratiquée. Les engins découverts au gré des signalements étaient systématiquement détruits sur place ou à proximité.

Les munitions françaises réservées dans divers dépôts du territoire d'Alsace (environ 5 000 tonnes en avril 1922) étaient destinées à être rassemblées pour être réalloties dans des entrepôts ad hoc. Sur décision ministérielle de novembre 1921, ces projectiles devaient être non dirigés vers l'emplacement initialement pressenti de Mützig, mais vers l'ERGMu de Chemilly dans l'Yonne. Le dépôt de munitions françaises de Schweighausen fut le premier concerné par ces mesures[1292]. Cette opération se trouva ralentie par le manque de main d'œuvre à disposition du PAPS « *l'évacuation serait rapidement faite si nous disposions d'une main d'œuvre suffisante, mais les conditions dans lesquelles la classe 20 a été libérée et la classe 22 va être appelée, font que nous ne disposons entre le mois de mars à juillet que d'un personnel tout à fait restreint*[1293] ».

Ainsi, sur la période de juillet à octobre 1921, furent retirés et détruits pour chacune des circonscriptions respectivement 4 435, 12 018 et 42 400 engins de guerre. Ces opérations avaient un prix, d'abord humain. Sur la période d'avril 1921 à juillet 1921, 17 ouvriers civils et un artificier militaire furent tués et 13 ouvriers civils blessés dans l'exécution de leur mission de désobusage[1294].

Mais en réalité, le massif vosgien n'a été que très partiellement désobusé, les premiers « nettoyages » restèrent superficiels du fait de la spécificité de ce territoire. L'origine de cette situation est multifactorielle, comme explicité dans au § 3.3.3 suivant.

[1292] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire, Commandant le Parc d'Artillerie de Strasbourg à Monsieur le Commissaire Général de la République, *op. cit.*

[1293] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. 21e Corps d'Armée. Commandement de l'Artillerie. Etat-Major. Le Général Maréchal Commandant l'Artillerie du 21e Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg. Epinal, le 9 avril 1922. Signé : Maud'Huy.

[1294] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement militaire de Strasbourg. Service des Munitions. Le Lieutenant Decaussin, chargé du Service du désobusage de la Subdivision de Mulhouse, Colmar à Monsieur le Chez d'Escadron Commandant le Parc d'Artillerie de Strasbourg. Rapport au sujet du Service de désobusage, Subdivision de Mulhouse et Colmar. Strasbourg, le 23 juillet 1921. Signé Decaussin.

3.3.3 Un désobusage partiel et superficiel en lien avec la spécificité du Territoire d'Alsace

> *« Peu se soucient des anciens champs de bataille sur les hauteurs. L'urgence est de relever dans les vallées et la plaine les bâtiments de leurs ruines[1295]»*

Contrairement aux autres secteurs du front de l'ouest, les terrains visés par le désobusage étaient escarpés, souvent difficiles d'accès et ne possédaient pas de vocation agricole, nécessitant une remise en état des sols la plus rapide possible.

La remise en état des terres dévastées ne fut pas aussi prégnante dans les Vosges que dans les secteurs agricoles riches comme en Champagne ou Picardie. Puis, on se soucia peu des hauteurs dévastées par les combats, préférant centrer les efforts sur les vallées et le piémont des Vosges, agricoles, industrieux pour relever les ruines.

Une autre explication est structurelle, et tient à l'organisation même du Désobusage. Le Parc d'Artillerie Régional (PAR) de Strasbourg se chargea de la tache en Moselle. Pour le massif des Vosges, le Parc d'Artillerie en charge de cette tâche était celui de Belfort, mobilisant des équipes d'artificiers qui étaient pourtant basés à plus de 100 km des terrains à nettoyer. Par ailleurs, les équipes détachées dans les Vosges durent emprunter des chemins à pieds pour accéder aux lieux où leur furent signalés des engins. Un artificier illustra ces difficultés en signalant par exemple « *qu'il lui est arrivé avec son équipe de parcourir 40 km dans une journée pour détruire un total que 3 ou 4 obus*[1296] ». Parfois même, en cas d'urgence des distances considérables durent être parcourues pour éliminer un seul engin. Ainsi, les destructions furent effectuées périodiquement (tournées) après, si possible, le rassemblement des trouvailles, ce qui ne fut pas une solution optimale en terme de protection des populations civiles locales qui eurent à côtoyer les engins en attente d'élimination. La tâche s'avéra laborieuse « *Ces pertes de temps sont notablement augmentées par les difficultés que rencontrent les Chefs d'équipe, pour obtenir soit la désignation suffisamment précise des points où gisent les engins, soit un guide pour les conduire*[1297] ». Dialoguer en français sur des terres allemandes depuis deux générations ne devait pas être aisé ; la barrière linguistique constitua vraisemblablement pour les artificiers militaires un réel handicap pour se faire comprendre et indiquer la localisation des engins à neutraliser.

Une enquête fut réalisée en 1930 par l'Artillerie au sujet des conditions dans lesquelles le Désobusage fut mené en Alsace et dans les Vosges. Le rapport d'enquête conclut sur l'inconvénient que le Service de l'Artillerie eut à endurer en se chargeant de la destruction des engins alors que dans d'autres régions de l'ancien front, cette tâche fut déléguée par contrat et adjudication à des entreprises civiles. « *Des investigations poursuivies au cours de l'été 1930, il résulte que, en ce qui concerne, les 7e et 20e Régions, les opérations de désobusage paraissent devoir se prolonger pendant de longues années encore, notamment dans les parties moins accessibles de l'ancien front, c'est à dire précisément dans des zones où l'intervention des parcs [ndlr : d'artillerie] est réalisée dans les conditions les plus médiocres* ».

La méthode et les moyens employés par le PAR dans sa mission de Désobusage purent aussi étonnamment contribuer à augmenter le nombre des accidents et les risques liés aux explosifs et munitions. Vu l'éloignement entre Belfort, où étaient stockés les matériels et explosifs employés par les artificiers, et les lieux sur lesquels ils eurent à intervenir, les désobuseurs constituèrent de petits dépôts d'explosifs intermédiaires, comme à Mulhouse et à Colmar.

[1295] Journal de Marche Officiel du 327e Régiment d'Infanterie.

[1296] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer), *op. cit*.

[1297] *Ibid.*

Ces artificiers se déplacèrent au moyen des transports en commun et transportèrent sur eux les explosifs qui auraient dû normalement être placés dans des trains de marchandise. Par ailleurs, lorsque les artificiers furent contraints de séjourner en dehors des villes de garnison, et furent logés chez l'habitant ou à l'hôtel, toujours en gardant sur eux les explosifs.

Mais le temps faisant, la nature reprit aussi rapidement ses droits sur les crêtes et les flancs des montagnes vosgiennes où les hommes s'étaient battus. La vitesse avec laquelle poussèrent ronces et broussailles excéda celle avec laquelle progressèrent les opérations d'enlèvement d'engins de guerre. Cette végétation cacha non seulement les projectiles affleurant à démolir mais entrava aussi la libre circulation des équipes d'artificiers. Des secteurs furent aussi volontairement reboisés. Cinq années furent alors nécessaires après les plantations, pour que ces jeunes pousses puissent être enlevées pour être replantées. Le desobusage des terrains ne put s'effectuer que dans des zones non soumises aux plantations pour reboisage et semis et l'enlèvement des engins à fleur de sol ne put être opéré qu'à la faveur des abattages et du développement des grands arbres qui « *aura provoqué la disparition des arbustres parasites* » qui cachèrent le sols et les engins qu'ils renfermèrent[1298]. Enfin, comme pour Pickett & Fils dans la forêt de Trélon (cf. Section 10h du présent manuscrit), désobuser en forêt ne fut pas une mince affaire du fait des difficultés d'accès et de circulation dans les bois et des dégâts forestiers occasionnés lors des pétardements et/ou des brûlages d'engins, de poudres ou d'explosifs. L'absence de convention entre les autorités militaires et l'Administration des Eaux & Forêts, créa des entraves administratives à la bonne marche des opérations. *« Des difficultés parfois assez sérieuses ont été rencontrées par le Service de l'Artillerie à l'occasion de destructions d'engins dans les forêts ; ces difficultés avaient leur source dans les points de vue différents auxquels se plaignaient les deux administrations : l'autorité militaire ne se préoccupant pas toujours suffisamment de la protection des bois laquelle fait l'objet de toute l'attention de l'administration forestière*[1299] ».

Tant bien que mal, le désobusage progressa dans l'entre-deux-guerres. Les tournées des artificiers ne visaient plus que l'enlèvement et la destruction de munitions éparses dont l'élimination en routine ne posa aucune difficulté technique. Ainsi, dans les 7e et 20e Régions militaires, le désobusage des engins épars s'avéra réalisable dans de bonnes conditions par des personnels civils et formés, qui présentaient l'avantage d'être stationnés au plus près des lieux des découvertes.

3.4. REVISION DE L'ORGANISATION DU DESOBUSAGE DANS LES ANNEES 30

Dans le début des années 30, l'Artillerie fit des propositions au Ministère de la Guerre afin d'améliorer le fonctionnement général du Désobusage en Alsace et dans les Vosges. Cette démarche s'inscrivit dans une démarche nationale de révision des modalités de fonctionnement du Désobusage.

[1298] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport particulier n°7/30 du 10 novembre 1930 au sujet du désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Non signé, *op. cit.*

[1299] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'Administration de l'Armée. 2e, 6e, 7e et 20e Régions. Places diverses. Désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer), *op. cit.*

Ainsi, dans les régions boisées, un personnel civil fut rapidement identifié comme étant le plus apte à mener à bien les opérations de désobusage. Il s'agissait du personnel habituellement alloué à la surveillance de ces terrains, à savoir les agents de l'Administration des Eaux & Forêts, dépendant alors du Ministère de l'Agriculture. Ce personnel fut aussi rattaché au Génie au moment de la mobilisation. Ce furent, pour les bois domaniaux, les gardes forestiers qui signalèrent déjà à l'Artillerie les découvertes d'engins de guerre. Certains même n'hésitèrent d'ailleurs pas à transporter de leur propre chef sur les bords des chemins les projectiles découverts à l'intérieur des bois. Il arriva aussi trop fréquemment que les feux allumés pour brûler les chutes de bois inutilisables provoquèrent l'explosion d'engins très légèrement enterrés. L'Artillerie proposa donc que ce personnel soit impérativement formé au désobusage et devienne opérationnel au plus proche des terres à désobuser.

Nonobstant l'emploi de certains gardes forestiers comme artificiers (moyennant une formation et le versement d'une indemnité de risque), il resta entendu que chaque fois que ces gardes se trouvaient en présence d'un engin « douteux » ou paraissant comporter des dispositions spéciales (engin fuyard, fumant, etc.), un appel au personnel du PAR restait de règle.

Les gardes forestiers auraient aussi été en charge de l'évaluation du degré d'urgence de l'intervention des artificiers militaires afin que ces derniers puissent organiser et optimiser leurs tournées d'enlèvement et/ou de destruction des engins. Le personnel du PAR conserva a priori, pour sa part la responsabilité des destructions des engins épars découverts en terrain dégagé, en dehors des bois, c'est à dire sur les parties les plus facilement accessibles du territoire, qui restaient aussi à l'échelle des Régions militaires celles qui recélaient les plus faibles densités de munitions.

Mais les dépenses qu'il aurait eu à engager pour l'élimination de quelques engins furent si disproportionnées que le PAR souhaita confier cette tâche aux militaires de la Gendarmerie qui, garante de la sécurité sur le territoire, exerça aussi son pouvoir de police, en particulier lorsque les destructions furent opérées d'office, c'est à dire, sans que l'autorisation du propriétaire des terrains concernés soit demandée.

4. Evacuation des dépôts de munitions et liquidation des surplus du Territoire d'Alsace-Lorraine

4.1. INTRODUCTION. CADRE GENERAL

4.1.1 L'absence d'exception alsacienne-lorraine

Les autorités centrales parisiennes, avec d'une part le Ministère de la Guerre et d'autre part le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks (dépendant du Ministère des Finances), cherchèrent à mettre en place dans le TAL un cadre organisationnel et un *modus operandi* pour la liquidation des stocks ex-allemands similaires à ceux mis par ailleurs en œuvre par ces mêmes services et ministères dans les autres Régions militaires pour éliminer des surplus français comme ex-allemands. Il s'agissait alors, faute de moyens militaires, de passer commande à des entreprises privées (réputées avoir les compétences requises en matière de récupération, de ferraillage et de neutralisation d'engins de guerre) par voie d'adjudication, suite à un appel d'offre ou en gré à gré. Avant 1929, il semblerait que l'essentiel des marchés aient été passés en gré à gré sans mise en concurrence. Ces entreprises répondaient à un cahier des charges standard produit et contrôlé par le Ministère de la Guerre. Les opérations de destruction furent placées sous le contrôle technique de l'autorité militaire, par l'entremise des Parcs d'Artillerie Régionaux (dans le cas présent, le Parc d'Artillerie de la Place de Strasbourg (PAPS)).

Les dépôts furent cédés à ces entreprises qui, après neutralisation et rebutage des engins de guerre, récupéraient les matières valorisables constitutives des restes de guerre, pour les revendre, les écouler dans le marché, moyennant un versement à l'état d'une redevance forfaitaire indexée sur la tonne de métal.

Les opérations de démolition des surplus de guerre, notamment ex-allemands, en Alsace furent engagées dès fin 1919 par des industriels sous contrat avec l'Etat. Le désobusage contractuel fut donc dans le TAL très précoce comparativement aux opérations engagées suivant le même schéma dans les autres Régions militaires concernées par la Grande Guerre.

Le recours aux entreprises privées serait possiblement une conséquence (i) du défaut de personnel militaire mobilisé et mobilisable sur ces territoires qui ne furent que localement directement concernés par les combats de la guerre, (ii) par la prépondérance des matériels ex-allemands qui n'intéressèrent pas en 1918-1919 les militaires français et dont la démolition fut jugée prioritaire par le Ministère de la Guerre. En Alsace-Lorraine, les enjeux du désobusage portèrent essentiellement sur les dépôts ex-allemands situés dans la plaine, la question du nettoyage des sols des anciens champs de bataille en altitude, dans les Hautes-Vosges, restant marginale et non prioritaire.

Le GQG y appliqua pourtant les instructions diffusées au sein des commandements des autres Régions militaires du quart nord-est de la France pour gérer les REG dans l'immédiate sortie de guerre, avec comme mots d'ordre (i) le tri des projectiles en distinguant ceux en bon état et encore utilisables (en l'état ou après réfection) et ceux obsolètes et/ou endommagés à détruire, (ii) le rassemblement des munitions dans des dépôts gardés en priorisant la récupération des munitions françaises utilisables et (iii) la recherche et la démolition, si nécessaire, des munitions ex-allemandes. Mais, comme cela est décrit et explicité dans le présent manuscrit, contrairement aux autres régions militaires, des munitions ex-allemandes furent préservées et réservées parallèlement aux destructions.

Les opérations industrielles contractuelles suivirent dans le TAL des trajectoires singulières, jalonnées d'obstacles, en lien avec les particularismes culturels et administratifs alsaciens-lorrains et le contexte singulier de la sortie de guerre en Alsace-Lorraine, débouchant, en Moselle, sur des impasses. Cet historique du désobusage ne trouve pas d'équivalent ailleurs en France et me permet d'établir un lien, voire un rapprochement, avec l'histoire de la démilitarisation de l'Allemagne sous occupation alliée (en rive gauche du Rhin) (cf. Section 10h du présent manuscrit).

4.1.2 Contractualisation précoce avec des entrepreneurs civils

Territoire d'Alsace

Dès 1919, soit moins d'un an après l'armistice du 11 novembre 1918, le Ministère de la Guerre, via le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), passa des contrats avec des entrepreneurs privés pour la démolition des dépôts de munitions abandonnés sur le territoire d'Alsace-Lorraine. Il n'est fait aucune mention dans les archives consultées d'une quelconque mise en concurrence. Les contrats furent donc vraisemblablement conclus au terme d'une procédure de gré à gré. Deux entreprises se partagèrent les démolitions des munitions en Alsace.

Un premier contrat fut passé le 7 juillet 1919 entre le Ministère de la Guerre et le Ministère des Finances et l'entreprise Clere & Schwander (également dénommée « *Société anonyme de récupération de munitions* » dont le siège était à Paris), pour l'élimination sur place des huit dépôts ex-allemands implantés dans ou à proximité de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*) totalisant 8 400 tonnes de munitions.

Le contrat privé conclut par l'Etat français avec Clere & Schwander en juillet 1919 fut possiblement une première, un marché pionnier, en ce qui concerne la démolition industrielle des engins de guerre en France, s'agissant du marché le plus ancien de ce type identifié dans les archives.

L'entreprise Bouxin passa un contrat le 15 juillet 1920 avec le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), pour le traitement de 16 000 tonnes de munitions (conventionnelles, explosives) issues des dépôts ex-allemands essentiellement implantés dans le Bas-Rhin en plaine, comme au niveau de certains cols du massif des Vosges (Marxenhausen, Ganzau, Donon, Hantz, Urbeis, Kastenwald, Heiteren, Soultz, La Source, Niedermuspach) et dans le Haut-Rhin (Jettingen et Vieux-Ferrette).

Territoire de Lorraine

La Société Lorraine des Produits Industriels (SLPI) fut déclarée adjudicataire du marché de destruction des munitions du territoire de Lorraine (actuel département de la Moselle) en septembre 1920, par un contrat approuvé le 19 octobre 1920[1300]. Comme pour le Territoire d'Alsace, la contractualisation s'opéra sans mise en concurrence.

4.2. LES CHANTIERS DE DESTRUCTION DE MUNITIONS CLERE & SCHWANDER DE LA FORET DE LA HARDT (*HARTWALDLAGER*)

L'objectif assigné par le PAPS par contrat à Clere & Schwander était initialement l'élimination du tonnage de 8 400 tonnes d'engins de guerre pour le 7 janvier 1920 (soit six mois de travaux) pour faire part à l'urgence. Le nettoyage des dépôts de la circonscription de Mulhouse fut considéré comme prioritaire à l'échelle du territoire d'Alsace. Le PAPS ne jugea pas utile d'encadrer ce chantier sur le plan réglementaire, ou n'avait pas connaissances de ces obligations. Les destructions de munitions débutèrent en octobre 1919.

La question de l'attribution d'un statut régulier aux chantiers Clere & Schwander de la forêt de la Hardt se posa lorsque le délai d'exécution des travaux fut prorogé à juillet 1921.

4.2.1 La recherche d'un cadre réglementaire pour des opérations industrielles peu ordinaires

Clere & Schwander exploita en forêt et rencontra les mêmes difficultés que l'entreprise F.N. Pickett & Fils, en 1920 dans son usine *C-Factory* de Trélon Liessies dans le département du Nord (cf. Section 10h du présent manuscrit). Il n'y eut initialement, à l'ouverture des chantiers entre juillet et octobre 1919, aucun accord entre l'industriel (et/ou le Service de l'Artillerie) et l'Administration des Eaux & Forêts, en conséquence de quoi, l'entreprise dut se plier aux exigences du droit commun, à savoir le Code forestier.

L'Article 148 de ce code interdisait l'usage du feu en forêt, ce qui rendit illégales les opérations de brûlage des explosifs, nécessaires au déchargement des projectiles. Les points à régulariser furent, selon cette Administration des Eaux & Forêts dont dépendait la forêt de la Hardt (i) la location des parcelles où se trouvaient les dépôts, (ii) la définition des responsabilités, à qui incombaient les réparations des dégâts matériels et (iii) l'autorisation d'utiliser des locomotives vapeur en forêt, ce qui était à ce moment-là strictement interdit. En premier lieux, un contrat de location des terrains occupés par les dépôts de munitions fut passé entre le propriétaire, l'Administration des Eaux & Forêts, et le locataire, le PAPS, ce dernier faisant supporter ces charges à l'exploitant Clere & Schwander.

[1300] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Directeur de la Société Lorraine de Produits Industriels de Thionville (Moselle) à Monsieur le Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks. Marché relatif à la démolition des munitions de Lorraine. Thionville le 22 mai 1921. Signé : Soubielle.

Au mois de septembre 1920, soit quinze mois après passation du marché, l'Inspection Divisionnaire du Travail et le commandement du PAPS s'accordèrent pour supprimer du contrat la clause permettant d'encadrer les chantiers de destruction de munitions au titre de la réglementation sur les Établissement dangereux ou insalubres (selon la loi du 19 décembre 1917 modifiée relative aux établissements dangereux, insalubres ou incommodes). Les arguments avancés étaient le caractère temporaire de l'activité et l'éloignement des chantiers de démolition des habitations.

Enfin, l'Inspection du travail souligna dans son courrier du 20 septembre 1920 que « *la procédure de classement nécessiterait un délai très long et provoquerait l'arrêt de tous les chantiers en exploitation contrairement à l'intérêt général qui demande la disparition totale de ces engins dangereux dans le minimum de temps ; en outre, le fait de les soumettre au classement n'aurait nullement pour effet de renforcer le contrôle technique exercé sur ces établissements par l'autorité militaire*[1301] ». Le caractère urgent, temporaire, exceptionnel et d'utilité publique des opérations industrielles contractuelles réalisées par la société Clere & Schwander fut donc avancé collégialement par les différentes administrations en charge de la liquidation des surplus ex-allemands en Alsace afin de sursoir aux obligations réglementaires courantes des installations industrielles dangereuses ordinaires.

Le courrier du Directeur des Eaux & Forêt à Monsieur le Commissaire Général de la République du 2 septembre 1921[1302] précise que Clere & Schwander omit de mettre en application les exigences des Articles VII, VIII et XII de son contrat de juillet 1919, à savoir le « *respect du droit local, l'interdiction d'étendre les ateliers au-delà des limites initialement fixées, sans prévenir le service forestier et sans prendre au préalable toutes les mesures de protection nécessaires pour préserver les peuplements, et, pour chaque atelier, la fixation, après entente avec les autorités locales, des mesures de précaution à prendre* ». L'Administration forestière reprocha aux donneurs d'ordre de ne pas avoir eut communication de la réglementation en vigueur, applicable à la désignation des implantations des ateliers et des aires de brûlage. Le service forestier eut donc recours à des inspections pour faire constater, procès-verbaux à l'appui, les infractions au Code forestier, en absence de cadre réglementaire et face aux recrudescences d'accidents et d'incendie en forêt (comme l'incendie du 25 mars 1921) « *Pour dégager sa responsabilité et déterminer une action quelconque il n'a été trouvé d'autre moyen que de faire dresser des procès-verbaux par ses forestiers [ndlr : l'administration des Eaux & Forêts] au fisc militaire ainsi qu'aux quelques chantiers de désamorçage et de destruction exploités par les srs Clerc [sic] & Schwander*[1303] ». Le conservateur des forêts de Colmar revint finalement de façon pragmatique et raisonnée sur sa position (dépôt de plainte avec de possibles poursuites) (courrier du 2 septembre 1921) et reconnut le caractère exceptionnel des opérations en trouvant un compromis. Il sursit à toute action en justice pendant une période de deux mois (septembre et octobre 1921) sous réserve que ce délai fut aussi utilisé par le PAPS pour faire entrer la société dans la légalité « *Pendant cette période, le brûlage des munitions pourra être repris à la condition toutefois que les prescriptions des contrats passés par le concessionnaire avec l'administration de la guerre soient respectées* ».

[1301] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. L'inspection divisionnaire du travail d'Alsace et de Lorraine à Monsieur le Lieutenant-Colonel Jost de Stael, Commandant le Parc d'Artillerie de Place à Strasbourg. 20 septembre 1920. Signé : l'Inspecteur divisionnaire

[1302] *Ibid.*

[1303] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar le 25 mars 1921. Signé : Charles Valette.

Le préfet du Haut-Rhin à Colmar prit aussi en 1922 des dispositions pour réglementer les chantiers conformément à l'Article 16 du Code professionnel, comme entrant dans la catégorie des établissements de pyrotechnie et de préparation de matières inflammables de toute nature[1304].

Plus de deux ans et un rapport de force entre l'administration civile et l'autorité militaire, furent donc nécessaires pour régulariser le statut et le cadre réglementaire de l'exploitation eu égard aux exigences des différentes administrations et services compétents.

4.2.2 Ateliers exploités et typologie des engins à rebuter

Sept ateliers fonctionnèrent dans la Hardt, à Grünhütte, Schlierbach, Fortsweck, Bandzenheim, Fallbrück, Hombourg et Hardtwald. La société vendait les obus caffûtés de 77, 105, 150, 155, 210 et 240 mm à la Société des Produits métalliques de Forbach (département de la Moselle) au prix de 100 francs, pour être ensuite revendus en Allemagne (Saarbrücken[1305], Dortmund[1306], Wissen[1307], Duisburg[1308]). La localisation des anciens ateliers Clere & Schwander en forêt de la Hardt n'est pas précisée, mais il semble vraisemblable que pour des raisons évidentes de logistique et de sécurité (afin de réduire au stricte minimum le transport et la manipulation des engins de guerre tout en conservant une distance minimale avec les dépôts de munitions), ces ateliers aient été installés à proximité des quatre grands dépôts du *Hartwaldlager* (cf. Section 7h du présent manuscrit). Ces ateliers devaient être nombreux et dispersés au même titre que les dépôts de munitions organisés par les Allemands. Les précieux plans des installations de désobusage font défaut.

Les munitions à décharger et à détruire furent des engins ex-allemands caractéristiques de la fin de la guerre, parmi lesquels une forte proportion de munitions chimiques. Parmi les obus détruits figuraient des obus toxiques à *Croix bleue* (arsines), des obus à *Croix verte* (phosgène), et des obus à *Croix jaune* (*Ypérite*). Dans le dépôt de munitions dit de Bartenheim, situé entre cette localité et Boltzheim, furent stockées quelque 30 000 grenades « poires » chargées de poudre noire que Clere & Schwander entreprit de décharger[1309].

4.2.3 Méthodes et moyens de déchargement et destruction des munitions

Comme pour l'entreprise Bouxin en forêt d'Illkirch, il n'existe aucun document conservé aux archives de Strasbourg décrivant précisément les installations, les méthodes, moyens et les procédés mis en œuvre par Clere & Schwander. Les correspondances diverses versées aux archives départementales du Bas-Rhin[1310] renferment quelques bribes d'informations qui aident à comprendre le mode opératoire suivi par Clere & Schwander dans la Hardt.

[1304] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar le 17 juin 1922. Signé : Charles Valette.

[1305] *Vereinigte Stahlwerke an der Zypen. Otto Lazard et Cie.*

[1306] *SEE und Kanalschifffahrtgesellschaft, Wilhem Heimsoth.*

[1307] *Wissener Eisenhütte AG.*

[1308] *Mr Adler Junior, Lager Duisburg.*

[1309] Bibliothèque nationale de France. *Journal L'Alsace* du 14 avril 1920.

[1310] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402 et 121 AL 408. Correspondances.

A noter que cet industriel exploita aussi dans le canton de Spincourt, dans le nord-meusien, parallèlement au chantier de la Hardt, des installations de démolition de munitions très diverses, essentiellement chimiques (dont le nombre s'élèverait à 1 500 000 engins), pour lesquelles des archives (écrits et photographies anciennes) existent et permettent de bien documenter les méthodes et moyens de neutralisation pratiquées par cet industriel (cf. Section 11h du présent manuscrit).

Les méthodes de neutralisation des engins de guerre de Clere & Schwander dans la Hardt furent celles communément appliquées pour les projectiles explosifs et chimiques dans d'autres chantiers du même type :

- Destruction par pétardement des engins non démontables,
- Démontage et vidage des munitions par brûlage, vidange ou fusion à l'eau chaude selon la nature du chargement. Les projectiles étaient dé ceinturés pour récupérer le cuivre après avoir neutralisé par le retrait de la gaine, des fusées, la fonctionnalité militaire des projectiles.

Les maisons forestières de Grünhütte et de Salzlecke (sur la commune d'Ottmarsheim) furent endommagées par les explosions de démolition. Clere & Schwander pétarda donc des projectiles et/ou matières explosibles, non loin de ces maisons. L'industriel y fit sauter au moins trois tonnes d'engins. Ces destructions de circonstances visaient les obus explosifs ou les obus à balles (*Shrapnels*) chargés et amorcés qui n'avaient pu être démontés du fait de l'impossibilité de retrait de fusées trop dégradées. Les champs d'explosion situés non loin des maisons forestières furent ceux exploités en 1919 par les troupes de la IV^{e}Armée pour le début de l'élimination des dépôts de munitions.

Dans le chantier de Schlierbach, les obus explosifs chargés du puissant explosif standard allemand *Amatol* (TNT et nitrate d'ammonium), de *Mélinite* ou de dinitrobenzènes, étaient, comme à Illkirch, vidés et déchargés par fusion à la vapeur. Les explosifs furent certainement brûlés et/ou revendus. Le brûlage des explosifs était réalisé dans les chantiers de Hombourg, Hartwald et Falbrück.

Les obus chimiques à chargement liquide (comme ceux à *Croix jaune*) furent vidangés. Le rapport du commissariat spécial de police de Mulhouse daté du 8 mai 1922, précisait les méthodes très singulières utilisées pour le vidage de ce type de projectile[1311] « *L'obus qui renferme le liquide est percé d'un trou de 15 mm par lequel s'écoule le liquide. Quand l'obus est placé dans la position de vidage, le liquide passant dans un tube en fer est dirigé sous terre où il s'infiltre*[1312] ». L'objectif premier de cette méthode du « puits perdu » fut de supprimer toutes possibilités de contact avec les agents agressifs et de limiter les risques de formation d'une nappe gazeuse comme cela pouvait se produire avec un vidage à l'air libre. Ce procédé suscita des inquiétudes environnementales, la nappe phréatique d'Alsace étant réputée vulnérable et sensible aux pollutions issues de la surface.

[1311] Comme l'*Ypérite* et certains agents chimiques lacrymogènes.

[1312] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Ministère de l'Intérieur. Commisariat spécial de police., Mulhouse (Haut-Rhin). Obus à gaz asphyxiants dans la forêt de la Hardt. Rapport. N°3831. Envoyé à : Direction Strasbourg, Préfet, Sous-Préfet. Mulhouse, le 8 mai 1922.

Monsieur le préfet du Haut-Rhin, Charles Valette, dans son courrier du 17 juin 1922, mit en garde le Commissariat Général de la République contre les dangers de pollution des eaux souterraines et s'exprima en ces termes « *D'après les renseignements reçus, l'autorité militaire n'aurait pas encore prescrit toutes les mesures nécessaires dans l'intérêt de l'hygiène et la sécurité tant des ouvriers que du public, ou au moins ses prescriptions ne sont pas observées. J'attire aussi votre attention sur les dangers de contamination du sous-sol que présente l'évacuation des liquides et gaz toxiques dans des trous de forage*[1313] ». Il s'agit d'une des rares allusions à la mise en péril environnementale en lien avec les opérations de destruction de munitions, identifiées dans le corpus d'archive collecté dans le cadre de cette recherche.

Clere & Schwander procéda au vidage des engins chimiques en suivant des séquences de travail successives et spécifiques à chaque catégorie de projectile. Un ordre d'urgence fut adopté pour les destructions et fut imposé à Clere & Schwander par le PAPS en démolissant prioritairement (i) « *les munitions les plus susceptibles de produire un incendie ou une explosion (grenades, artifices, poudres)*[1314] » puis (ii) les projectiles explosifs et enfin (iii) les engins à chargement chimique. En avril 1920, le déchargement des munitions chimiques n'avait pas encore débuté.

Selon le courrier du lieutenant Cornevaux, chargé par le Service des Munitions de la subdivision de Mulhouse et contrôleur militaire de Clere & Schwander, à Monsieur le Général Commandant l'Artillerie du VIIe Corps d'Armée du 17 juin 1922, des opérations de vidage d'obus à *Croix jaune*, chargés d'*Ypérite*, par brûlage, auraient aussi été menées, et uniquement de nuit, lorsque le chantier était vide de personnel. Le vidage des obus à *Croix verte* s'acheva en avril 1921.

Ces opérations furent réalisées sur le terrain de Hombourg. Le lieutenant Cornevaux adressa un courrier au sous-préfet de Mulhouse en indiquant qu'à la date du 10 mai 1922, l'ensemble des obus à *Croix verte* et à *Croix bleue* avaient été vidés dans la Hardt. Les archives n'apportent aucune information permettant de connaître les modalités de destruction des obus à *Croix bleue*. Les arsines vomitives renfermées dans ces obus étaient contenues à l'état solide dans des fioles en verre ou dans des réservoirs en tôle cannelée insérés dans l'explosif (cf. Section 1h du présent manuscrit). Ces arsines ne pouvaient être infiltrées. Ainsi, trois alternatives étaient envisageables pour s'en débarrasser : (i) évacuation hors site pour leur enfouissement ou leur coulage terrestre ou maritime, (ii) leur enfouissement sur site ou (iii) leur brûlage à l'air libre (*Open Burning*).

À cette date, Clere & Schwander exploitait déjà son site meusien où la technique du brûlage (en tranchées) fut retenue et opérée pour éliminer les obus à *Croix bleue*, selon des méthodes également courantes au sein de la maison F.N. Pickett & Fils dans le nord de la France (cf. Section 10h du présent manuscrit). Il est vraisemblable que l'industriel ait procédé de la même manière dans son chantier de la Hardt.

La destruction des engins chimiques tarda car elle nécessitait dans un premier temps des études spécifiques pour définir les méthodes, moyens à mettre en œuvre puis dans un second temps l'approbation des modes opératoires par le Ministère de la Guerre.

[1313] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Monsieur le Préfet du Haut-Rhin, à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg. Courrier du 17 juin 1922. Signé : Charles Valette

[1314] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant P.I. le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, Ier Section. Strasbourg, le 6 avril 1921. Signé : Salvaire.

Il est indiqué dans le rapport du chef d'escadron Salvaire d'avril 1921 que « *la société [ndlr : Clere & Schwander] vient de mettre au point un procédé que je soumettrai à l'approbation ministérielle dès que les renseignements nécessaires me seront parvenus* [1315]». F.N. Pickett & Fils exploitait déjà à cette date ses chantiers de Trélon, de Westroozebeke et de Dannes Camiers dans lesquels des munitions chimiques étaient neutralisées. Ces deux industriels furent les seuls au début des années 20 à procéder et à maîtriser la neutralisation des projectiles chimiques pour en extraire à des fins commerciales les matières constitutives valorisables. Le Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions adressa à cet industriel un courrier daté du 31 mars 1924, qui reste le seul document identifié dans le cadre de cette recherche faisant le rapprochement entre F.N. Pickett & Fils et Clere & Schwander (Hardt) « *We were obliged, not forgetting the exceptional circumstances in which you were placed (result of war) to impose upon you a series of measures which only experience taught us. It should be noted that you were the only one – apart from the Sté Clere et Schwander, who were operating in the Forst of the Hardt – to execute such dangerous work […]*[1316] ».

Comme nous allons le voir à la Section 10h du présent manuscrit, F.N. Pickett & Fils développa des méthodes bien particulières de déchargement des munitions chimiques, sous l'impulsion de l'ingénieur et officier russe Kostevitch. Les archives consultées ne font pas état de relations, d'échanges techniques, entre F.N. Pickett & Fils et Clere & Schwander. Il n'est pas exclu que les Services de l'Artillerie aient imposé à Clere & Schwander (comme ils le firent avec d'autres industriels du domaine) des méthodes développées et ayant fait la démonstration de leur efficacité dans les chantiers F.N. Pickett & Fils.

Ces travaux de recherche historique mais aussi les investigations effectuées sur le terrain à la faveur d'études à vocation environnementale montrent que les méthodes employées par ces deux industriels étaient assez similaires en ce qui concerne la neutralisation des munitions chimiques ex-allemandes.

4.2.4 Une exploitation émaillée d'incidents, d'accidents et de sinistres

Des opérations à risques multiples

Ces opérations de déchargement de munitions chimiques étaient particulièrement dangereuses à double titre avec les risques d'incendie et d'explosion d'une part et les risques d'intoxication et de brûlures chimiques d'autre part. En ce qui concerne la sécurité sur le chantier, des mesures préventives de protection des travailleurs furent prescrites par la Corporation textile et des industries chimiques : ports du masque à gaz, de vêtements en toile huilée, de gants et de bottes en caoutchouc. Les souillures devaient par ailleurs être éliminées au plus tôt. Du chlorure de chaux fut mis à disposition pour neutraliser les égouttures d'*Ypérite* si nécessaire. Malgré ces mesures, l'exploitation des ateliers fut jalonnée par de nombreux accidents graves correspondant soit à des intoxications, soit à des explosions intempestives d'engins explosifs.

Des intoxications parfois légères à l'aniline (avec comme symptômes, des maux de tête, ivresse, bleuissement des lèvres et jaunisses) et aux nitrobenzènes étaient monnaie courante dans les ateliers de déchargement des obus explosifs par fusion à l'eau ou à la vapeur.

[1315] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant P.I. le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, *op. cit.*

[1316] National Archives, Kew Gardens, London, number TS 36/227. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, 1 place St. Thomas d'Aquin. Paris, 31st March 1924 « *Nous avons été obligés, sans oublier les circonstances exceptionnelles dans lesquelles vous étiez placés (résultat de la guerre) de vous imposer une série de mesures que seule l'expérience nous a enseignées. Il est à noter que vous étiez le seul - en dehors de la Sté Clere et Schwander, qui opérait dans la forêt de la Hardt - à exécuter un travail aussi dangereux* »

Entre janvier et juin 1922, 40 accidents graves dont trois mortels étaient à déplorer[1317]. Un décès, survenu le 22 mai 1922, fit suite à des brûlures et à une intoxication par l'*Ypérite* lors d'opérations de vidage.

La préfecture du Haut-Rhin resta impuissante face à la multiplication des incidents et accidents, ne pouvant pas saisir l'Inspection du travail, et s'en remit à l'administration militaire. La Corporation du textile et de l'industrie chimique menaça de ne plus payer les rentes dues aux accidentés ou à leurs ayants droit, louvoyant et arguant le fait que les intoxications relevaient de maladies professionnelles et non d'accidents. *«[…] les accidents successifs survenus récemment […] provoquent dans le milieu ouvrier intéressé une certaine agitation*[1318] » qui s'inscrivait en 1920 dans un climat général au niveau français de récession économique, de mouvements et de revendications sociaux. En juin 1920, l'ingénieur en chef de Clere & Schwander, Eugène Haas fut violemment molesté par les ouvriers qui l'accusaient de ne pas prendre les mesures de sécurité qui s'imposaient.

L'explosion mortelle catastrophique du 13 avril 1920 à Bartenheim

L'accident le plus grave se produisit en avril 1920 à l'atelier de déchargement de Bartenheim. 300 à 400 grenades firent explosion tuant 15 ouvriers et en blessant grièvement 10 autres. Cette explosion était due à la négligence du chef d'équipe Chabert qui, contre l'avis de l'ingénieur en chef, commença à décharger des projectiles à poudre noire sans avoir au préalable débarrassé les lieux de tout ce qui encombrait la zone de travail. Par ailleurs, selon le journal *L'Alsace* des 30 et 31 octobre 1920, la poudre noire recouvrait le sol, répandue par des tiers venant voler « *des obus [ndlr. Grenades] pour la pêche* ».

Les ouvriers vidaient la poudre noire des projectiles et pour accélérer le vidage, lorsque la poudre restait collée au sein de l'enveloppe métallique, frappaient tout simplement dessus. La poudre prit feu induisant l'explosion des grenades prises dans les flammes. Chabert fut aussi tué dans l'explosion.

De toute évidence, les précautions de sécurité les plus élémentaires n'avaient pas été respectées, ce à quoi conclut aussi le rapport de l'Inspecteur Lepelletier du Service des Munitions, qui rajouta que le sol devait aussi être maintenu humide et le travail devait être exécuté sans objet métallique, par des ouvriers distants en groupes n'excédant pas deux personnes, et dotés de chaussures dépourvues de clous[1319]. L'affaire fut portée devant le tribunal régional et fut jugée avec pour verdict la condamnation pour négligence de l'ingénieur Haas à trois mois de prison et 600 francs d'amende (Journal L'Alsace des 30 et 31 octobre 1920).

Mais cette affaire et cet accident eurent des répercussions non seulement judicaires mais également contractuelles, voire politiques. Il est en effet vraisemblable que l'exécution des contrats en vigueur, dans la Hardt comme à Spincourt dans la Meuse furent temporairement suspendu afin de produire des avenants aux contrats visant à renforcer la sécurité des chantiers (cf. Section 7h du présent manuscrit).

[1317] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Republikaner de Mulhouse (en langue allemande), titrant « *Opfer der Profitsucht. Über 40 schwere Unfälle, drei Tote in einem halben Jahr* », relayé en juin 1922 par l'Echos de Paris. Traduction « Victime de la quête du profit. 40 accidents graves, trois morts en une demi année ».

[1318] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar, le 15 juin 1920. Signé : Valette.

[1319] Bibliothèque nationale de France. *Quotidien L'Alsace* des 30 et 31 octobre 1920.

Protestations et attaques de l'opposition. Quand la liquidation des munitions ex-allemandes devient politique

Mr Auguste Wicky[1320] (cf. Figure 191 ci-contre), chef socialiste (SFIO) du département du Haut-Rhin annonca par voie de presse (Le *Republikaner* de Mulhouse (en langue allemande, titrant « *Opfer der Profitsucht. Über 40 schwere Unfälle, drei Tote in einem halben Jahr* [1321]»), relayé en juin 1922 par *l'Echos de Paris*)[1322], qu'il comptait interpeller le Commissaire Général de la République devant le Conseil Consultatif au sujet de la multiplication des accidents dans les chantiers exploités par l'entrepreneur Clere & Schwander.

Figure 191 : Auguste Wicky à gauche en présence de Charles De Gaulle à la libération de Mulhouse, le 21 novembre 1944[1323].

Jouant sur l'affect, avec emphase, il s'exprima en ces termes *« Nous élevons nos protestations les plus vives contre un jeu aussi frivole avec la vie des ouvriers, et nous accusons particulièrement l'autorité compétente de s'être pour raison d'économie déchargée de ces travaux dangereux sur une société privée, qui apparemment met son profit au dela de la santé et de la vie de ses ouvriers. La Guerre a cependant détruit assez de vies humaines, fait assez de Veuves, d'orphelins et de mutilés et il serait enfin temps que l'on prenne plus d'égard pour la vie et la santé des travailleurs* ».

Il s'agissait clairement d'une attaque contre le gouvernement de centre-droit du Bloc national, auquel appartennaient tous les députés et sénateurs d'Alsace, dont, dans le Haut-Rhin, l'un des hommes forts était le général Bourgeois, maire de Sainte-Marie-aux-Mines, scientifique reconnu, ancien directeur du Service géographique de l'Armée. La situation sécuritaire précaire et la survenue d'accidents dans les chantiers de la Hardt vinrent donc atiser l'opposition alsacienne locale de gauche contre l'administration centre-droite mise en place à Strasbourg depuis Paris.

4.2.5 Une menace toxique anxiogène planant au-dessus de la Hardt

Ces accidents, relatés par la presse locale, ne firent que renforcer le climat anxiogène qui régnait autour des chantiers de démolition des munitions chimiques de la Hardt. Ce que craignaient avant tout les populations des habitations les plus proches, comme ailleurs en France pour des opérations similaires ,c'était la genèse et la propagation d'un nuage gazeux de toxiques de guerre émanant des projectiles chimiques.

[1320] La mainmise allemande de quatre ans durant la Première Guerre mondiale, exacerba l'hostilité mutuelle des mulhousiens francophiles et des « Vieux-Allemands », particulièrement après la déclaration de l'état de siège en Alsace. Arrêté en 1915, Wicky fut emprisonné pendant neuf mois pour son « attitude anti-allemande (« *Deutschfeindlichkeit* ») avant d'être astreint à résidence jusqu'à la fin de la guerre. De sensibilité social-démocrate, il choisit de rester fidèle à la SFIO (à laquelle la fédération mulhousienne, de tendance réformiste, avait adhéré en février 1919) après la scission du congrès de Tours.

[1321] « Victime de l'appât du gain. Plus de 40 accidents graves et trois morts en une demi-année »

[1322] Archives départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. *Le Republikaner* de Mulhouse *l'Echos de Paris*, *op. cit.*

[1323] https://www.dna.fr/culture-loisirs/2020/11/20/diaporama-la-liberation-de-mulhouse-le-21-novembre-1944-comme-si-vous-y-etiez-zabn

En Alsace, le dépôt du *Hartwaldlager* fut dès 1920 menacé par des incendies restés fort heureusement sans conséquences en raison des conditions météorologiques et hygrométriques favorables « *L'an dernier déjà des incendies facilement circonscrits, par suite de l'humidité persistante avaient appelé l'attention sur le danger possible de cette accumulation de munitions*[1324] ».

Cette menace devint réelle lorsqu'en mars 1921 « *Un récent incendie [qui] a eu lieu dans la forêt de la Hardt au N.E. de l'Ile Napoléon a fait ressortir le danger réel que constituent à l'heure actuelle les nombreux dépôts de munitions (principalement les dépôts d'obus à gaz toxique) qui sont installés dans la forêt. [….] Le dernier incendie s'est arrêté parait-il à 200 m environ d'un lot d'obus à gaz toxique, le vent soufflant de l'est aurait amené certainement une nappe de gaz sur Mulhouse. De l'avis d'un officier supérieur du Génie qui a été consulté, l'explosion de ce dépôt aurait provoqué une catastrophe*[1325] ». La présence de ces dépôts de munitions ex-allemandes abandonnés, dont les faits attestent de leur grande vulnérabilité sans toutefois faire la démonstration de leur réelle dangerosité, suscita auprès des populations locales riveraines potentiellement exposées une vive anxiété qui fut portée à la connaissance de l'administration civile « *Les populations des villages voisins de ces dépôts vivent depuis plusieurs mois dans un état d'anxiété continu et leurs alarmes viennent de se manifester à nouveau à l'occasion de cet incendie par une véritable panique et l'exode des habitants de certains villages* [1326]». Dans la Hardt, la présence de vapeurs toxiques était avérée. En effet, après vidage des obus chimiques, il subsistait toujours des égouttures de produits agressifs qui se condensaient sur les intrados des engins et des fragments métalliques.

« *Sous-bois, ces gaz se rassemblent dans des parties basses et y restent en stagnation, jusqu'à ce que le vent finalement les emporte hors de la forêt. C'est ainsi que la nappe rencontrée sur la route de Battenheim et l'Île Napoléon a dû être chassée hors du bois où elle avait dû s'amasser petit à petit depuis quelques jours. […]. M'étant rendu sur les lieux, j'ai pu constater qu'à la fraîcheur du matin l'air est imprégné de gaz qui dégagent une odeur âcre et que ces gaz disparaissent au fur et à mesure que le soleil monte*[1327] ».

Des habitants de l'Île Napoléon à Mulhouse furent incommodés (avec dépôts de plaintes) par l'odeur désagréable dégagée par le brûlage des obus à *Ypérite.* Ces émanations étaient locales, temporaires et n'avaient aucun caractère dangereux pour la population. L'autorité militaires se voulait rassurante en apportant aux autorités civiles des éléments techniques le justifiant (pas toujours pertinent en affirmant que les obus à arsines pouvaient émettre des vapeurs délétères).

[1324] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République. Colmar, le 25 mars 1921.

[1325] *Ibid.*

[1326] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Commissaire Général de la République au Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (section Artillerie). Paris 16e. Strasbourg le 19 mai 1921. Signé : Alapetite.

[1327] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Ministère de l'Intérieur, Commissariat spécial de police. Mulhouse (Haut-Rhin). Obus à gaz asphyxiant dans la forêt de la Hardt. Rapport. Mulhouse, le 8 mai 1922.

4.2.6 Des démolitions poussives ne pouvant être hâtées

En date d'avril 1921, l'entreprise avait démoli 4 762 tonnes, soit environ la moitié du tonnage d'engins que l'Artillerie lui avait cédé[1328] alors qu'elle s'était engagée contractuellement parlant à tout éradiquer pour janvier 1921. Les Services de l'Artillerie octroyèrent à l'industriel un délai supplémentaire pour honorer ses obligations en repoussant l'échéance au 1er juillet 1921, sans réclamer de pénalités de retard. « *Les concessionnaires se sont d'ailleurs refusés jusqu'ici à signer l'avenant qui établit ces pénalités et leur impose des charges qui n'étaient pas prévues par leur marché. Ni la Liquidation des Stocks ni l'autorité militaire ne disposent, de par le marché en question, des moyens de contrainte nécessaires pour obtenir les signatures dont il s'agit ou pour faire hâter les travaux*[1329]».

L'absence d'organe de police chez le donneur d'ordre et de sanctions prévus au contrat initial fragilisèrent significativement la bonne marche des opérations de désobusage industriel contractuel et pénalisèrent le donneur d'ordre, impuissant à imposer ses exigences.

Les opérations de déchargement des munitions dans la forêt de la Hardt s'achevèrent vers le 16 juin 1922 au terme de presque trois années d'exploitation. Du 17 au 25 juillet 1922, le personnel fut licencié et les ouvriers furent alors employés aux travaux de terrassement pour la remise du terrain aux autorités militaires.

4.3. EXPLOITATION DU CHANTIER DE DEMOLITION DE MUNITIONS EXPLOSIVES EN FORET D'ILLKIRCH PAR L'ENTREPRISE BOUXIN

4.3.1 Bouxin. Dénaturation des engins conventionnels au centre de rassemblement du MA3

La contractualisation avec Bouxin s'opéra le 15 juillet 1920, soit un an après la passation du marché avec Clere & Schwander, la nature des engins à rebuter par Bouxin n'ayant pas été jugée prioritaire par rapport aux projectiles chimiques ex-allemands confiés à Clere & Schwander.

En effet, contrairement à Clere & Schwander, les lots de munitions à détruire ne comportaient pas d'engins chimiques. Par contre Bouxin eut l'exclusivité de l'élimination des projectiles (« bombes ») de tranchée.

Possiblement, la passation du marché Bouxin fut retardée suite à l'explosion accidentelle d'avril 1920 à Bartenheim, qui mit en exergue des lacunes et défauts dans la sécurité des chantiers de destruction de munitions et donc en corollaire la nécessité d'y remédier. Le centre d'élimination des REG, désigné par « MA3 » (pour *Munitionsanstallt n°3*) (cf. Section 6h), fut installé sur un terrain, loué à Bouxin, dans le Bois d'Illkirch-Graffenstaden, au sud de Strasbourg. Le PAPS y procéda au rassemblement des dépôts de munitions avancés, proches des anciennes lignes de front, en réglant ses envois de munitions sur la capacité de démolition du chantier d'Illkirch et le rythme des opérations de dénaturation.

Le terrain du MA3 accueillait aussi déjà un dépôt de munitions, d'environ 5 000 tonnes, constitué par l'Armée allemande dès 1916. Malgré certaines réticences, tout fut entrepris pour que l'usine de démolition soit installée et exploitée.

[1328] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant P.I. le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, *op. cit.*

[1329] *Ibid.*

Par son courrier du 05 décembre 1918, le maire d'Illkirch-Graffenstaden informa Monsieur le Haut-Commissaire pour l'Alsace-Lorraine de l'intérêt à installer un centre de désobusage sur le site du MA3, cette activité pouvait assurer un emploi à quelques centaines d'ouvriers parmi les 1 000 employés de l'ancienne usine de munitions remerciés à l'armistice. Par ailleurs, cette usine disposait aussi de moyens modernes permettant d'effectuer la démolition d'engins dans de bonnes conditions. Bouxin bénéficia donc tout simplement de l'excellent matériel existant et des installations construites par les Allemands pour démolir leurs munitions. Ce furent au final 21 000 tonnes d'engins de guerre, projectiles d'artillerie classique et d'artillerie de tranchée qui auraient été rassemblées à Illkirch pour y être éliminées. Dans son contrat, Bouxin s'était engagé à démolir mensuellement[1330] 800 tonnes à partir de mars 1921.

4.3.2 Destructions de munitions intransportables et l'atelier Bouxin de la forêt de la Hardt

Des destructions de munitions (très probablement par pétardement) furent aussi pratiquées dans les dépôts ex-allemands du col du Donon et du col du Hantz (Rothau), dans le département du Bas-Rhin, avant que les engins résiduels ne soient transférés à l'usine de démolition de la forêt d'Illkirch[1331]. 517 tonnes de bombes de tranchées (« *Minen* » de *Minenwerfer*) issues des dépôts du *Hartwaldlager* étaient réservées pour l'entreprise (Pascal) Bouxin, qui exploitait aussi un terrain de destruction en forêt de la Hardt, ainsi qu'un atelier de désamorçage.

Des encoches destinées au dévissage et au retrait des fusées et gaines-détonateurs étaient réalisées sur le dépôt de Jettingen, avant que les bombes de tranchées soient transportées. Les engins arrivaient donc depuis la Haute-Alsace déjà neutralisés à Illkirch[1332]. Les archives ne précisent pas ce qu'il advint des fusées et gaines d'éclatement provenant du désamorçage mais elles furent certainement pétardées.

Bouxin éliminait dans son chantier de la Hardt les munitions qu'il ne réussissait pas à désamorcer par pétardement [1333], en particulier celles dotées de fusées en fer, typiques des projectiles allemands de la fin de la guerre (cf. Section 1h du présent manuscrit). L'existence de cet atelier de Bouxin dans la Hardt est attestée dans les archives qui relatent l'accident mortel qui y survint le 20 mai 1922, lors des opérations de dévissage ; l'explosion d'une bombe tua deux ouvriers et en blessa deux autres[1334].

4.3.3 Méthodes de déchargement des bombes de tranchée au MA3

Les projectiles explosifs étaient vidés par fusion à la vapeur. Ce procédé polluant fut à l'origine chez l'entreprise Bouxin, et dans bien d'autres cas, chez Clere & Schwander et F.N. Pickett & Fils, d'intoxications de personnels par les dinitrobenzènes et l'aniline toxiques contenus dans les explosifs ex-allemands (ces explosifs étaient les seuls à générer une phase gazeuse).

[1330] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Article 2 de son contrat, modifié par le 7e avenant.

[1331] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement militaire de Strasbourg. Commandement Supérieur du Territoire d'Alsace. Etat-Major. Le Général Humbert à Monsieur le Commissaire Général de la République. Destruction de munitions. Strasbourg, le 5 novembre 1920. Signé : Bourgine.

[1332] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402, 121 AL 408.

[1333] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Service de l'Artillerie. Subdivision de Mulhouse. Le Lieutenant Cornevaux chargé des services de l'Artillerie à Monsieur le Général Commandant l'Artillerie du 7e C.A. Mulhouse, le 17 juin 1922.

[1334] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gendarmerie Nationale. Légion d'Alsace-Lorraine. Compagnie du Haut-Rhin. Rapport du Lieutenant Ducay, commandant la Gendarmerie de la Section sur l'explosion d'un projectile de guerre. Altkirch, le 31 mai 1922.

Les cas d'intoxication aux dinitrobenzènes rendirent l'administration méfiante et suspicieuse sur conditions de sécurité au travail au sein du chantier de Bouxin. Bouxin mit en pratique à Illkirch, dès juin 1921, un procédé de tronçonnage (vraisemblablement sous l'eau) des bombes de tranchées (tout comme dans son chantier isérois des Burettes (cf. Section 10h du présent manuscrit)). Enfin, le brûlage des explosifs furent possiblement réalisés sur un terrain localisé au sud du MA3, à proximité de la ferme de Schafhardt, une fois le terrain réquisitionné par le Ministère de la Guerre après le refus catégorique de la commune d'Illkirch, propriétaire du terrain, de voir s'y installer un terrain de brûlage (cf. § 4.3.4 et § 4.3.5).

L'exploitation du chantier de la forêt d'Illkirch se heurta à des difficultés en lien avec la spécificité des engins démolis et la particularité du contexte administratif et socio-politique local.

4.3.4 Les inextricables écueils du désobusage en Alsace

Ecouler des explosifs allemands non réglementaires

La marche du désobusage industriel à Illkirch se heurta aussi à de multiples difficultés qui la ralentirent. Elles étaient d'abord conjoncturelles. Bouxin n'échappa pas comme ses confrères aux difficultés financières liées à la chute des cours des métaux de récupération dès fin 1921. Mais ces difficultés résidèrent aussi, comme pour Clere & Schwander et d'autres entités opérant dans le désobusage en France, dans des écueils administratifs, réglementaires générés par des clauses contractuelles floues, imprécises. Ils se traduisirent dans les faits (i) par des pertes financières difficilement supportables par l'exploitant, déjà en proie aux conjonctures économiques défavorables et (ii) par la menace, pour l'Etat, de voir disparaître ces entreprises s'étant engagées dès 1919 par leurs compétences affichées à solutionner un problème relevant des responsabilités de l'Etat. Mais plus encore que dans les autres Régions militaires concernées par les opérations de désobusage sous contrat, ce fut le contexte socio-politique local si singulier qui pesa dans le TAL, dans la conduite puis la conclusion ou non des opérations de liquidations des REG ex-allemands.

Bouxin ne fut pas autorisé à commercialiser les explosifs de récupération extraits des engins de tranchées (50 à 80 tonnes d'explosifs) suite à un litige qui opposa d'une part la société Bouxin et d'autre part le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks et le Service des poudres. Ce litige résidait dans le refus du Service des poudres de la mise en vente des explosifs de récupération provenant du chantier du MA3.

En effet le contrat du 13 juillet 1920 entre le Service des poudres et le Sous-Secrétaire d'État, relatif à la destruction des munitions allemandes du Territoire d'Alsace, stipulait dans son Article 9 : « *Les poudres et explosifs devront être rendus inertes ou détruits. Toutefois, en vue d'éviter la destruction des produits encore utilisables, Monsieur Bouxin sera autorisé à céder à des tiers les poudres et explosifs pouvant être employés dans l'industrie et dans les mines, en tenant compte des réglementations relatives à la vente des poudres explosives dont l'État a le monopole et au transport des matières explosives* ». Un avenant à ce contrat précisait « *Les dispositions […] ne seront applicables qu'aux explosifs de sûreté qui pourraient se trouver dans certaines munitions* ». Or les explosifs chargeant les munitions allemandes, démolies par Bouxin, n'étaient pas réglementaires en France. L'industriel n'avait alors d'autres alternatives que de s'en débarrasser par brûlage.

L'affaire des indemnisations pour le MA3. Le différend entre l'autorité militaire et la commune d'Illkirch

Bouxin eut à subir une situation litigieuse qui opposait la mairie d'Illkirch d'une part et l'Armée et l'Etat, d'autre part au sujet du terrain sur lequel il devait travailler. Dès mars 1919, Mr le Maire d'Illkirch-Graffenstaden s'adressa par courrier au Haut-Commissaire de la République à Strasbourg, (Gabriel Alapetite) demandant à ce que la commune soit indemnisée pour la réquisition en décembre 1916 par l'autorité militaire allemande (en invoquant les Articles de la loi du 13 juin 1873 sur les prestations de guerre (*Kriegsleistungsgesetz*)) d'une parcelle boisée d'environ 25 hectares pour y installer l'usine de munitions et les dépôts du MA3[1335].

Des négociations furent entamées dès le 3 septembre 1919 entre la commune et deux officiers du PAPS. Le 1er octobre 1919, les revendications de la commune étaient évaluées par un représentant du Gouverneur Militaire de Strasbourg (le Commandant Chatenet) et l'Inspecteur des Forêts (G. Luneau). S'ensuivit une proposition de la commune transmise par courrier à Monsieur le Général Commandant l'Artillerie de Strasbourg (général Fetter[1336]) le 8 octobre 1919, restée sans suite jusqu'au 27 janvier 1920. Le maire d'Illkirch prit alors l'initiative d'une entrevue avec le général Fetter pour accélérer la question du règlement des indemnités, qui eut lieu le 30 janvier 1920, et déboucha sur une position consensuelle. Le maire demanda à ce que ce soit l'Etat et non la commune qui fasse une proposition. Le 23 février 1920, la commune fut saisie d'une proposition écrite de la part du général Fetter.

La commune répondit le 19 mars 1920 par un projet de bail. Le 27 août 1920, le PAPS informa le maire que ce projet avait été envoyé le 9 avril 1920 au Ministre de la Guerre[1337] mais aucune suite n'avait été donnée en août 1920. Le 16 novembre 1920 une lettre du PAPS fit connaitre à la commune par décision du 17 septembre 1920 que le Ministre de la Guerre décida d'acquérir les terrains du MA3 et réclama une promesse de vente à adresser au PAPS, document établit le 4 janvier 1921 et valable pour une durée de six mois.

En l'absence de décision, la commune s'adressa au Commissaire Général de la République de Strasbourg le 2 avril 1921 afin qu'une décision soit prise dans les meilleurs délais. Excédé, le maire interpella le Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace[1338] le 30 août 1921 lui demandant d'intervenir.

Le 15 septembre 1921, c'est le général de division de Boissieu, Gouverneur militaire de Strasbourg, par pouvoir du Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, qui répondit et assura son soutien et son intervention « *auprès de qui de droit* » ainsi que le versement d'une avance sur les indemnités dues. Le temps passant, la promesse de vente de janvier 1921 émanant de la commune d'Illkirch tomba en obsolescence. En conséquence, le chef d'escadron Salvaire, commandant du PAPS, demanda à la commune une nouvelle promesse de vente ; une offre valable jusqu'au 9 mai 1922 fut produite.

[1335] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Lettre mémoire du 7 janvier 1922 de Mr le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin. Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402.

[1336] Général Fetter (1860-1929). Marie Hippolyte Alfred Fetter. Auteur de Méthodes de tir de l'artillerie à pied allemande (1898).

[1337] Du 20 janvier 1920 au 16 décembre 1920, André Lefèvre (1869-1929) succèda à Clemenceau.

[1338] Auguste Édouard Hirschauer (1857-1943) est né à Saint-Avold (département de la Moselle). En 1914, Hirschauer est général commandant une brigade d'aérostiers et travaille sous les ordres du général Gallieni. Il désira se battre et commande la 29e Brigade d'infanterie puis la 6e Division d'infanterie. Promu général de division, il prit part aux batailles de l'Ourcq (septembre 1914), de Champagne (début 1915) et de Verdun (1916). Lors de l'offensive Nivelle, Il s'empara de Craonne (4 mai 1917) et devient le héros du Chemin des Dames. Le 19 novembre 1918, il fit une entrée triomphale à Mulhouse, à la tête de ses troupes.

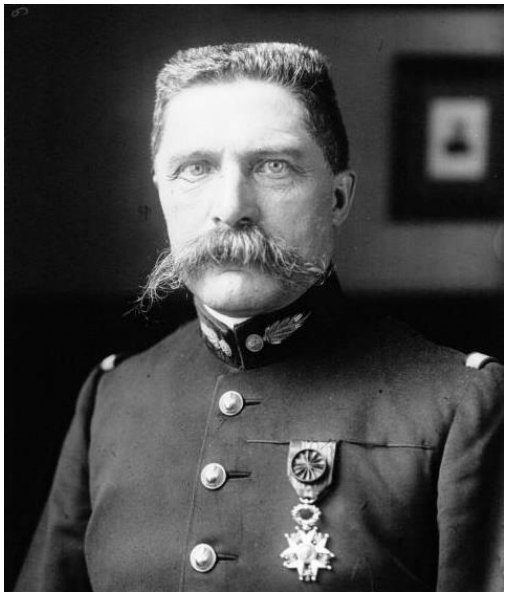
Le 22 décembre 1921, la commune fut informée par le Sous-Intendant Thouvenot de Strasbourg « *qu'il est alloué à notre commune pour l'occupation d'une parcelle de forêt par le Service de l'Artillerie, du 11 novembre 1918 au 23 octobre 1921, la somme globale de 3 050 francs* ». Le refus fut catégorique le 27 décembre 1921 pour les 25 hectares du MA3 « *Supposant que ceci représentait l'indemnité que l'administration militaire offrait à notre commune pour l'occupation des terrains du MA3* ». Le maire, incrédule, considéra cette proposition *« illégale et injuste envers une pauvre petite commune* ». En effet, le Service de l'Artillerie louait alors (sans retombées pour la commune) le MA3 au loyer mensuel de 1 000 francs à l'industriel Bouxin pour la démolition des munitions conventionnelles du territoire d'Alsace.

Le bois seul, présent sur le terrain en question, fut estimé par l'Administration des Eaux & Forêts à 570 000 francs et le terrain à 376 431 francs. Il conclut son courrier en ces termes « *[…] il est inadmissible qu'on traine la solution et qu'entre temps, l'Administration militaire exploite nos terrains à son profit et qu'on fasse la sourde et qu'on mette la municipalité dans la pénible situation ou bien de négliger les intérêts qui lui sont confiés, ou de devoir faire le procès à l'Etat Français, qui a été attendu avec une confiance inébranlable pendant 48 ans et dont le retour a été salué avec un enthousiasme qui ne connaît pas son pareil dans toute l'histoire* ». Puis, le maire termina en demandant à Georges Weill (cf. Figure 192) « *de vouloir porter à la connaissance de Monsieur le Ministre de la Guerre*[1339] *le litige* ».

Au terme de 33 mois d'échanges épistolaires entre la commune et diverses strates des autorités civiles et militaires, régionales et centrales, pour une prise de décision sur un litige et un règlement d'une situation héritée du temps de guerre et du temps allemand, ce fut le *statu quo*. Le courrier, avec sa description chronologique minutieuse des échanges, met en exergue l'immobilisme d'une administration française, et des décisions, lorsqu'elles sont prises, dénuées de sens logique au regard des préoccupations locales. La multiplication des interlocuteurs auxquels s'adressa la commune témoigne (i) de la nébuleuse administrative installée par les Français en Alsace mais aussi (ii) de l'impuissance des élus locaux face aux règlements des questions de l'occupation allemande et l'omniscience de l'autorité militaire qui semblait faire fi des questions et droits civils. Ces situations entretinrent un climat de défiance des civils d'Alsace et des pouvoirs civils locaux à l'égard des nouvelles structures décisionnelles et administratives importées par la France qui reprenaient possession, après plus de 40 ans d'administration allemande, des territoires anciennement annexés d'Alsace-Lorraine.

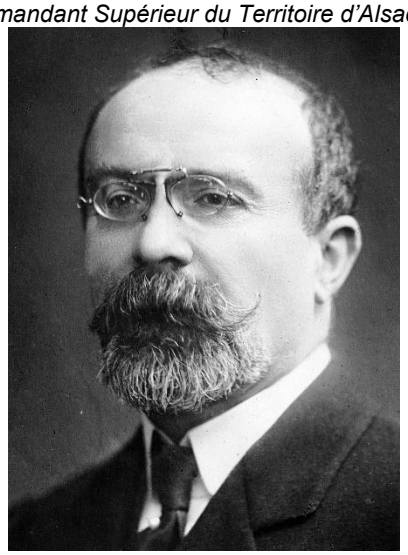
[1339] Louis Barthou (1862-1934) du 16 janvier 1921 au 15 janvier 1922.

Georges Weill[1340], Conseiller Général du Bas-Rhin



Le Général Auguste Édouard Hirschauer, Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace[1341]

André Lefèvre, Ministre de la Guerre (du 20 janvier 1920 au 16 décembre 1920)[1342]



Louis Barthou, Ministre de la Guerre (du 16 janvier 1921 - 15 janvier 1922)[1343]

Figure 192 : Georges Weill, le Général Auguste Édouard Hirschauer, André Lefèvre, et Louis Barthou, Ministres de la Guerre.

[1340] Député du *Reichstag* de 1912 à 1915. Né à Strasbourg le 17 septembre 1882 et mort à Paris 10 juillet 1970. Après la Première Guerre mondiale, militant SFIO, conseiller général du Bas-Rhin, il fut candidat malheureux à la députation en 1919, et choisit lors du congrès de Tours, auquel il participa, de soutenir la ligne de Léon Blum, avant de se rapprocher de Renaudel et de se retrouver dans le courant néo-socialiste. Dans les débats alsaciens, il fut un farouche adversaire de l'autonomisme. Il s'opposa notamment à la pérennisation du droit local. Elu député du Bas-Rhin en 1924, il fut battu en 1928. Bibliothèque nationale de France. Agence de presse Mondial Photo-Presse

[1341] Bibliothèque nationale de France, Agence de presse Meurisse — French general Auguste Édouard Hirschauer (1857-1943) as colonel in 1912.

[1342] Succèdera Flaminius Raiberti (1862-1929) du 16 décembre 1920 au 16 janvier 1921 puis du 16 janvier 1921 au 15 janvier 1922, Louis Barthou (1862-1934). Prints and Photographs division de la Library of Congress des États-Unis sous le numéro d'identification ggbain.31564.

[1343] George Grantham Bain Collection (Library of Congress) numéro d'identification ggbain.37067.

4.3.5 Opposition de la commune à l'extension du chantier Bouxin à Illkirch

Au printemps 1922, Bouxin dut détruire 600 tonnes de bombes de tranchées. Pour ce faire, il devait aménager une aire de brûlage suffisamment éloignée des ateliers et du dépôt de munitions, pour des raisons évidentes de sécurité, et donc se doter d'une voie ferrée permettant d'y acheminer les engins à brûler. Le terrain pressenti pour ces destructions par brûlage était situé au sud du MA3, près de Schaffhausen, à l'est du Fort Uhrich (cf. Figure 149, de la Section 5h du présent manuscrit). La voie ferrée projetée reliait le dépôt de munitions du MA3 à ce terrain. L'autorisation d'installer ce terrain de brûlage et ses dessertes lui fut refusée par la commune d'Illkirch, suite au différend entre l'autorité militaire et le maire d'Illkirch concernant le terrain du MA3, suscitant l'inquiétude du Service de l'Artillerie qui sollicita un appui du Commissaire Général de la République « *car les explosifs n'ont pas une durée de conservation indéfinie ; tôt ou tard une décomposition spontanée se produira qui pourra se traduire par une explosion en masse infiniment redoutable pour les localités avoisinantes. Je vous demande en conséquence de vouloir bien user de votre haute autorité et au besoin des pouvoirs que vous avez entre les mains pour obliger la commune d'Illkirch à cesser une opposition qui ne peut que lui être très préjudiciable*[1344] ».Le Commissariat Général de la République et la préfecture du Bas-Rhin mirent fin au différend. Le Commissaire Général enjoignit le Directeur des Voies Ferrées et Route d'indemniser dans les plus brefs délais possibles les propriétaires des parcelles sur lesquelles avait été implanté le dépôt de munitions du MA3 selon « *la procédure prévue pour le maintien de ce dépôt, par arrêté du 11 octobre 1920*[1345] ». Par ailleurs le dépôt de munitions fut maintenu et le MA3 fut définitivement converti en terrain militaire impliquant « *une procédure d'expropriation dès que M. le Préfet du Bas-Rhin aura pris les arrêtés de cessibilité prévue par la réglementation locale*[1346] », le Ministère de la Guerre se chargeant pour sa part de réunir la commission d'expropriation qui fixa les montants des indemnisations au(x) propriétaire(s). Il est donc probable dans ces circonstances que Bouxin ait pu *in fine* installer son terrain de brûlage et procéder à la destruction des 600 tonnes de bombes de tranchées.

4.3.6 Clôture du chantier Bouxin à Illkirch

Ces difficultés entravèrent la bonne marche des opérations. Ainsi, au troisième trimestre 1921, Bouxin était à 973 tonnes en deçà de ses engagements contractuels, se traduisant par l'application de pénalités de retard qui fragilisaient encore plus la santé financière de l'entreprise. Malgré ces difficultés, Bouxin arriva à ses fins. Entre octobre 1921 et avril 1922, il démolit les engins au rythme de 470 à 697 tonnes par mois, tandis que le dépôt de rassemblement du MA3 fut encore alimenté en munitions suite à la liquidation des dépôts ex-allemands de Vieux Ferrette (en janvier 1922, département du Haut-Rhin) et de Battenheim et Grünhutte (en mars 1922) appartenant au *Hartwaldlager* où opérait encore Clere & Schwander (à hauteur de 275 à 375 tonnes par mois).

[1344] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. 21e Corps d'Armée. Commandant de l'Artillerie. Etat-Major. Le Général Marchal, Commandant l'Artillerie du 21e Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République. Strasbourg, le 5 mai 1922. Signé : De Pouydraguin.

[1345] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Commissariat Général de la République. Le Commissaire Général de la République à Monsieur le Directeur des Voies Ferrées et Route. Maintien du dépôt de munitions. Strasbourg, le 20 mars 1922. Signé : illisible.

[1346] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. J.N. Secretariat Général. Monsieur le Conseiller Général. Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin. 23 mai 1922.

Au 1er avril 1922, il restait à Bouxin à neutraliser une quantité conséquente de munitions (3169 tonnes, contre seulement 145 tonnes pour Clere & Schwander dans la Hardt)[1347]. En mai 1922, l'entreprise Bouxin était encore active dans la Hardt[1348]. Des archives conservées au Service Historique de la Défense (cf. § 5 de la présente section) montrent que des munitions ex-allemandes datant de la Première Guerre mondiale étaient encore stockées au MA3 dans les années 30. Il est vraisemblable que Bouxin ne démolît pas l'intégralité du matériel ex-allemand rassemblé dans le dépôt du MA3. Comment et dans quelles conditions a-t-il achevé son travail à Illkirch ? Là encore, les archives, parcellaires, laissent ces questions ouvertes.

4.4. L'HISTOIRE SINGULIERE DE LA DEMOLITION DES MUNITIONS EX-ALLEMANDES DU TERRITOIRE DE LORRAINE (DEPARTEMENT DE LA MOSELLE).

4.4.1 Rassemblement des munitions du Territoire de Lorraine au Bois de l'Hôpital

Deux dépôts majeurs avaient été installés par les Allemands en Moselle, l'un au sud-est de Metz (Bois de l'Hôpital), le second dans l'est du département entre Keskastel et Shopperten (Bois de Lorraine). Le dépôt du Bois de l'Hôpital fut identifié par le Parc d'Artillerie Régional (PAR) de Metz comme dépôt de rassemblement. Les engins (transportables) des dépôts mosellans dont celui du Bois de Lorraine devaient y être transportés et réallotis. « *Le dépôt de Silvange, ainsi que d'autres petits dépôts ont été évacué dont le contenu a été dirigé vers le Bois de l'Hôpital*[1349] *».*

[1347] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement Militaire de Strasbourg. Parc d'Artillerie. Execution des préscription de la note n°803 4/Al en date du 29 septembre 1921 du Commissaire Général de la République. Tableau indiquant au 1er avril 1921 l'état d'avancement de la destruction des munitions sur le Territoire d'Alsace. Strasbourg, le 4 avril 1922. Le Chef d'Escadron Salvaire, commandant le Parc. Signé : Salvaire.

[1348] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gendarmerie Nationale. Légion d'Alsace-Lorraine. Compagnie du Haut-Rhin. Rapport du Lieutenant Ducay, commandant la Gendarmerie de la Section sur l'explosion d'un projectile de guerre. Altkirch, le 31 mai 1922.

[1349] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Général de Division Berthelot. Gouverneur Militaire de Metz. Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République, *op. cit.*

Le général de division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz, Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine (cf. Figure 193 ci-contre), s'adressa au Commissaire Général de la République, à Strasbourg (Gabriel Alapetite), dans son courrier daté du 6 avril 1920. Ces mesures de rassemblement, semblant satisfaire la population et l'opinion publique, étaient nécessaires mais pas suffisantes selon le Général pour libérer les sols mosellans de la présence des restes de guerre dangereux hérités de l'occupation allemande. « *Des mesures analogues sont en cours ou vont être prises pour 2 ou 3 autres petits dépôts de munitions, mais cette mesure est insuffisante. Si elle donne satisfaction à l'opinion publique pour quelques dépôts au sujet desquels on fait une campagne de presse […]. « […] elle ne tranche pas la question générale des dépôts de munitions de Lorraine, qui contiennent dans leur ensemble 15 000 tonnes d'explosifs*[1350] ».

Figure 193 : Le Général de Division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz[1351].

4.4.2 La mise en garde du Général Berthelot (avril 1920)

Berthelot poursuivit « *J'ai l'honneur de vous faire connaître que la situation du dépôt de munitions du Bois de Silvange est la même que celle des autres dépôts de munitions du CSTL [ndlr : Commissariat Supérieur du Territoire de Lorraine], situation qui a été signalée à maintes reprises et sans qu'aucune décision du Commandement ait été prise. Ces dépôts sont au nombre de 14. Ils constituent de 500 à 5 000 tonnes d'explosifs et couvrent par suite une superficie considérable, qu'il est impossible de surveiller efficacement* » […] « *Des pourparlers ont été engagés avec des entrepreneurs civils pour la démolition des munitions, aucun n'a abouti. J'ai signalé personnellement au ministre les dangers que fait courir la présence de quantité aussi importantes de munitions qui se décomposent peu à peu et qui, indépendamment des risques provenant de la malveillance, peuvent avec les chaleurs de l'été prochain être une source de gros dangers. Aucune décision n'est intervenue. J'estime qu'il serait nécessaire de détruire, le plus tôt possible, toutes les munitions dont on ne prévoit pas l'emploi dans un avenir prochain (cession aux « Polonais, Tchequo-slovaques* [1352] ») - *Munitions Allemandes à conserver, comme les munitions françaises dans des locaux fermés*»

Le général Berthelot, en technicien et sachant, avaient parfaitement identifié la situation à risque pour les populations civiles et l'Etat, garant de leur sécurité, générée par ces vastes dépôts de munitions ex-allemandes, de moins en moins bien gardées, stockées à l'air libre, exposées aux intempéries et aux écarts de température susceptibles de déstabiliser toujours plus avant ces engins en puissance d'explosion, soulignant l'impérieuse nécessité à les évacuer et à les détruire, mais aussi à chercher à les entreposer dans de bonnes conditions.

[1350] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Général de Division Berthelot. Gouverneur Militaire de Metz. Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République, *op. cit.*

[1351] https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Berthelot#/media/Fichier:Berthelot-Metz_1920_2.jpg

[1352]. Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Général de Division Berthelot. Gouverneur Militaire de Metz. Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République, *op. cit.*

Comme en Alsace et dans les autres régions militaires concernées par les combats et les stockages de la Première Guerre mondiale, des industriels furent approchés pour libérer le Territoire de Lorraine des importants stocks de munitions anciennes abandonnées que le personnel militaire alloué au désobusage ne saurait ni évacuer ni détruire.

Les contrats privés de désobusage industriel en Alsace furent signés dès juillet 1919. En juillet 1920, en Moselle, rien n'avait encore été contractualisé.

Toutefois, selon la presse (Article du *Journal des débats politiques et littéraires* du 19 juillet 1920 [1353]), des démolitions de munitions auraient déjà été réalisées dans le vaste dépôt ex-allemand de munitions du Bois de Lorraine, possiblement par des équipes d'artificiers militaires où « *depuis quelques temps des artificiers font sauter des parties de munitions* ».

Ces premières opérations de destruction de munitions furent très vraisemblablement à l'origine d'un accident qui malheureusement, confirma le bien fondé des craintes du général Berthelot et renforça la pertinence de ses demandes.

4.4.3 Juillet 1920. Le signal d'alarme des premières explosions accidentelles au Bois de Lorraine

Le 16 juillet 1920, deux explosions ébranlèrent le dépôt du Bois de Lorraine. Les archives n'apportent aucune information concernant les causes de ces explosions. Les colonnes du *Journal des débats politiques et littéraires* du 19 juillet 1920[1354] précisent que « *à la suite d'une imprudence commise, croit-on, par un prisonnier russe[1355] occupé à ces travaux de destruction, le feu a pris dans un stock de fusées et s'est communiqué rapidement à une baraque contenant des bombes d'aviation* ».

Les détonations auraient été entendues à 20 km du point d'explosion, l'onde de choc détériorant plusieurs toits, brisant de nombreux carreaux dans la commune proche voisine de Sarralbe, où, les habitants, angoissés « *s'étaient déjà rassemblés pour fuir* [1356]». L'incendie qui s'ensuivit put être maîtrisé, avant de menacer de se propager sur d'autres secteurs du dépôt, notamment ceux renfermant « *entre autres, 40 000 obus à gaz*[1357] » et des opérations de sauvetage furent entreprises avec le soutien du 135e Régiment d'Infanterie venu de Sarreguemines. Les dégâts matériels furent considérables et fort heureusement aucune victime n'était à déplorer mais cet accident resta dans tous les esprits.

Dorénavant, ces dépôts ex-allemands laissés à l'abandon constituaient une réelle menace, autant d'Epées de Damoclès anxiogènes héritées du temps de guerre au-dessus des populations comme des autorités civiles locales, préfets et sous-préfets, impuissantes à solutionner le problème et une situation à risques qu'ils subirent à leur insu.

[1353] Bibliothèque nationale de France. Journal des débats politiques et littéraires. 19 juillet 1920.

[1354] *Ibid.*

[1355] Plusieurs catégories de Russes étaient présentes en France dans l'immédiat après-guerre : les anciens PG des Allemands, mais aussi les anciens des brigades russes (Corps expéditionnaire russe) envoyées en France pour combattre au côté des Alliés en 1916 par le Tsar. Inutilisables à partir de 1917, elles furent transformées en détachements de travailleurs, sauf une (maigre) Légion russe fidèle à l'Entente qui a combattu en 1918 et avait son dépôt à Laval. Beaucoup de Russes ne voulaient pas rentrer en Russie bolchevique (communication, J.N. Grandhomme). Dans l'après-guerre, certains d'entre eux, tout comme d'autres ressortissants des pays de l'est (des Polonais, Tchécoslovaques) furent employés à des tâches de récupération et de désobusage.

[1356] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) à Strasbourg. Strasbourg le 22 juillet 1920. Signé : illisible.

[1357] *Ibid.*

Le préfet du département du Bas-Rhin s'adressa ainsi par courrier daté du 22 juillet 1920 directement au Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) en signalant au sujet du dépôt du Bois de Lorraine « *Les dangers que constituait, pour la population des communes de Keskastel et d'Herbitzheim, la présence d'un dépôt de munitions à proximité de ces deux communes*[1358] » poursuivant par « *Le 16 juillet courant, deux explosions se sont produites dans ce dépôt, qui, d'après les renseignements qui me sont parvenus, est particulièrement important (on y compte encore, entre autre, 40 000 obus à gaz* ». « *D'après les renseignements du Sous-Préfet de Saverne […] les populations restent terrorisées et ne se trouveront vraiment rassurées que lorsque le dépôt aura disparu* ».

4.4.4 Octobre 1920. Contractualisation avec la Société Lorraine des Produits Industriels (SLPI) pour la liquidation des dépôts mosellans

Peu après cet accident, des dispositions semblent avoir été prises par le Ministère de la Guerre pour libérer le territoire de Lorraine des restes de guerre ex-allemands. La Société Lorraine des Produits Industriels (SLPI), dont le siège social était à Thionville (nord du département de la Moselle), fut déclarée adjudicataire du marché de destruction de munitions du territoire de Lorraine en septembre 1920, par un contrat approuvé le 19 octobre 1920. Le contrat entra en vigueur le 23 octobre 1920, soit presque deux ans après la fin des hostilités et le retour de la Moselle à la France. Cette entreprise s'engagea à détruire (industriellement et à des fins commerciales) en six mois quelques 15 000 tonnes de munitions ex-allemandes dans son usine du Bois de l'Hôpital (installée à proximité du dépôt de rassemblement)[1359]. Le dépôt du Bois de l'Hôpital totaliserait à lui seul 8 000 tonnes d'engins à neutraliser.

4.4.5 Le véto des Hospices de Metz et l'arrêt des préparatifs industriels

Le projet industriel du Bois de l'Hôpital fut dans un premier temps, en mars 1921, fragilisé suite au refus du propriétaire des terrains, les Hospices de Metz, de voir s'installer au sein du bois même, des aires de brûlage. Un terrain en friche attenant au bois et à bonne distance des villages avoisinants fut alors identifié pour accueillir les activités de brûlage.

La SLPI obtint pour son terrain de brûlage toutes les autorisations des maires des communes concernées, de l'Administration des Eaux & Forêts, du Service de l'Artillerie et de l'Inspection du Travail. La SLPI avait déjà commencé à amener près de 80 tonnes de matériel spécial, à construire la voie étroite Decauville qui devaient servir aux mouvements internes de l'usine, quand les Hospices de Metz firent arrêter tous les travaux, forçant l'industriel à démonter la voie posée « *en émettant des prétentions inadmissibles, soit pour la location, soit même pour l'achat du terrain, comme le proposait la Société. Ils font montre d'une mauvaise volonté évidente, et tout à fait à l'encontre du but poursuivi* »[1360]. Une caution de 10 000 francs fut par ailleurs réclamée par les Hospices pour couvrir les éventuels dommages causés. La Commission Administrative des Hospices, présidée, par le maire de Metz, exigea le versement de 500 000 francs pour l'occupation du terrain, jugé inculte « *ayant à peine une valeur de 10 000 francs* »[1361], conduisant le projet de chantier de démolition de munitions dans une impasse.

[1358] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) à Strasbourg, *op. cit.*

[1359] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Les dépôts de munitions allemands sur les Terrioires d'Alsace et de Lorraine. 26 avril 1921.

[1360] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du 31 mai 1921.

[1361] Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Directeur de la SLPI (Mr Soubielle) au Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks du 22 mai 1921,

4.4.6 Le désobusage industriel dans une impasse et la dégradation des dépôts de munitions

Presque trois ans après l'armistice, le dépôt du Bois de Lorraine, dont les munitions devaient être rassemblées sur l'usine mosellane SLPI du Bois de l'Hôpital, n'avait été que très partiellement évacué. Les risques d'accidents non seulement persistèrent depuis le retour des Français mais s'accentuèrent encore avec le temps, les conditions d'entreposage n'étaient plus adaptées, sans qu'aucune perspective de solutionner ce problème ne soit proposée par la gouvernance civile du TAL et l'autorité militaire aux élus locaux et à leurs administrés exposés au danger, dont les inquiétudes étaient grandissantes. Monsieur Karcher, maire de Sarre-Union, conseiller général du Bas-Rhin, demanda en assemblée plénière du Conseil Général à l'autorité d'Etat de remédier à cette situation. S'ensuivit un article dans la presse *La Dépêche de Strasbourg* du 6 avril 1921 qui s'en fit l'écho. Le titre de cet article reflète l'impuissance des acteurs de la vie locale se sentant « oubliés » face à ce dépôt au potentiel de destruction de magnitude quasiment géologique, résolument exagéré. « *Près d'un volcan ! Un camp de munitions « oublié » près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes !*[1362] ».

La présence dans ce dépôt d'engins à chargement chimique attisa l'anxiété autour de ce dépôt « *Dans les forêts, près des villages de Schopperten et de Keskastel, du canton de Sarre-Union, des parcs de munitions ont été établis pendant la guerre. Une petite partie de ces munitions a été enlevée, mais des quantités énormes de bombes asphyxiantes et autres trainent encore dans les bois*[1363] ». Ce dépôt ex-allemand menaçait la sécurité des populations civiles générales locales et notamment les enfants « *qui ne manquent pas d'aller y chercher ce qui leur convient […] les munitions emportées par les enfants dans les maisons, peuvent, en éclatant, tuer des familles entières* » faute de ne pouvoir être gardé efficacement par l'armée « *puisque la forêt de 40 hectares n'est gardée que par quatre soldats*[1364] ».

Mais le danger, selon le maire, concernait l'ensemble de ses administrés du fait de la présence avérée ou imaginée au sein de ces dépôts de projectiles chimiques qui pouvaient libérer des nappes de toxiques de guerre délétères « *Les munitions, surtout les bombes asphyxiantes, accumulées dans le parc, en éclatant, produiraient certainement une catastrophe dans la contrée*. *Notez qu'il suffirait d'un rien pour produire cette catastrophe. Les incendies dans la forêt ne sont pas rares. L'été dernier même il s'en est produit un dont, fort heureusement on put se rendre maître très rapidement*[1365] ». Ces propos furent repris par la presse germanophone « *Aus dem Granatenwald* » *Strasssburger Neue Zeitung* vom 8.4.21 n°96 « *wieder einmal Leben und Eigentum der Einwohner der umliegenden Orte schaften in Gefahr Stand* [1366]»[…] « *Eine grosse Beunruhigung hat erneut die Bevölkerung ergriffen*[1367] » ; la terreur générée par l'incendie et les explosions de juillet 1920 persistait encore dans tous les esprits.

[1362] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Près d'un volcan ! Un camp de munitions « oublié » près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes ! La Dépêche de Strasbourg. 6 avril 1921.

[1363] *Ibid.*

[1364] *Ibid.*

[1365] *La Dépêche de Strasbourg* du 6 avril 1921, *op. cit.*

[1366] « La vie et le bien des habitants des alentours sont à nouveau en état de danger ».

[1367] « Une grande inquiétude a à nouveau agité la population ».

4.4.7 Avril et juin 1921. Des dépôts à nouveau en proie aux flammes et explosions

Le 28 avril 1921 à 15h15 une explosion d'une grande violence ébranla à nouveau le dépôt du Bois de Lorraine. L'onde de choc fit voler en éclat les vitres des habitations de Schopperten, Keskastel et Sarralbe. Des dégâts furent aussi occasionnés aux bâtiments de Sarre-Union. Un vent de panique conduisit la population de Keskastel à la fuite, dans la crainte d'autres explosions plus violentes encore. L'Article de *La République* du 29 avril 1921 n° 117 (germanophone) (« *Explosion im Munitionspark bei Saar-Union. Weihin vernehmbare Detonationen – Panik in Keskastel. Keine Menschenopfer*[1368] ») relata l'accident et l'état de stupeur et d'effroi dans lequel semblât se trouver la population sous la menace de la détonation du grand dépôt « *Die Bevölkerung in weitern Umkreise lebte für einige Stunden unter den Eindruck einer kommenden Katastrophe und beruhigte sich auch nicht ganz*[1369] ». Ce furent à nouveau l'explosion des munitions chimiques et les émanations gazeuses toxiques qui pouvaient en découler qui étaient redoutées « *Man befürchtete vor allen Dingen die Explosion von Gasgranaten*[1370] ».

Les coupures de presse ayant couvert cet évènement sont rassemblées dans la Figure 194.

A 20 heures tout danger était écarté et les pompiers de Keskastel et Sarralbe quittèrent le Bois, avec au même moment le représentant de l'administration régalienne, le sous-préfet de Forbach. Le préfet de Strasbourg et Monsieur Karcher, étaient encore présents sur place quand l'Officier d'Administration chef artificier Michel du Parc d'Artillerie de la Place de Metz dépêché sur site arriva, trop tardivement pour constater l'incendie et les explosions. L'autorité civile et ses représentants firent ici la démonstration qu'ils étaient les réels garants de la protection des populations au plus près des préoccupations de leurs administrés, dans l'instant présent et l'urgence d'une situation, surclassant l'autorité militaire centralisée, incapable de gérer des urgences et n'intervenant que dans l'après-coup. Se joua peut-être en coulisse de ces situations accidentelles de guerre, héritée de la guerre, le bras-de-fer entre l'autorité civile locale désireuse de reprendre ou faire valoir ses droits et l'autorité militaire centralisée imposée par Paris et incapable de réagir face aux préoccupations du terrain.

L'artificier Michel se vit ainsi signifié de vive voix par le Préfet « *le désir de voir évacuer dans le plus bref délai possible les munitions stockées*[1371] ». Le Commissaire Général de la République adressa alors un courrier à Monsieur le Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (section Artillerie) daté du 19 mai 1921 afin de l'informer de la criticité de la situation à l'approche de l'été et des dangers « *[…] des obus à gaz […] qui présentent un danger particulièrement grand pendant les chaleurs de l'été*[1372] ».

[1368] Archives départementales du Bas-Rhin, cote 121 AL 402. *La République*. 29 avril 1921 n° 117 (germanophone) *Explosion im Munitionspark bei Saar-Union. Weihin vernehmbare Detonationen – Panik in Keskastel. Keine Menschenopfer*.

[1369] *Ibid.* « La population d'un périmètre plus éloigné vécut pendant quelques heures avec l'impression d'une catastrophe à venir et ne se calma pas complètement ».

[1370] *Ibid.* « On craignit avant toute chose l'explosion des obus à gaz ».

[1371] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport de l'Officier d'Administration Chef Artificier Michel du Parc d'Artillerie de la Place de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munition du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

[1372] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Commissaire Général de la République à Monsieur le Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (section artillerie). Strasbourg le 19 mai 1921, Strasbourg. Signé : Alapetite.

Le Commissaire Général de la République à Strasbourg signala ensuite au Sous-secrétaire d'Etat aux Finances le 31 mai 1921 « *L'urgence qu'il y aurait au point de vue de la sécurité publique, à libérer sans retard le Territoire d'Alsace des munitions en dépôts, classées à démolir, dont la présence constitue un danger particulier pendant les chaleurs d'été* »[1373]. Les échanges épistolaires se multiplièrent, décisions tardèrent, mais pas les accidents.

Le 29 juin 1921 c'était au tour du dépôt de rassemblement du Bois de l'Hôpital de subir un sinistre. Vers 14 heures 30, un feu de forêt s'y déclara et provoqua l'explosion d'environ 25 000 obus; les explosions se succédèrent jusqu'à 17 heures 30. Le feu fut *in fine* maîtrisé par l'intervention rapide d'un détachement de troupes de l'Artillerie de Metz. Les causes du sinistre restèrent inconnues et seuls des dégâts matériels (destruction de 70 tonnes d'obus) étaient à déplorer. Là encore selon la presse « *Dès les premières alertes, MM. le Préfet et le Sous-Préfet de Metz-Campagne s'étaient rendus à proximité du théâtre de l'explosion*[1374] ». Comme au Bois de Lorraine fumées colorées, odeurs suspectes alimentèrent au sein des populations proches voisines des interprétations subjectives et faussement alarmistes, et entretinrent une perception biaisée de la réalité effective des risques. Selon le quotidien *Le Lorrain* du 29 juin 1921 « *Aucun incendie de forêt comme on se l'imagine ; les feuilles mortes seules se consument lentement, et la fumée jaune qui plane sur le bois est due à l'acide picrique qui se dégage de certains obus qui éclatent. Ce que les habitants redoutent, c'est l'explosion des obus à gaz*[1375] ». Le 5 juillet 1921**,** autre incident : un prisonnier de guerre russe fut tué et un autre blessé par l'explosion au dépôt du Bois de l'Hôpital d'un obus allemand de 77 mm pendant une manutention[1376].

[1373] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du 31 mai 1921.

[1374] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Explosion d'un dépôt de munitions à Pouilly. *Le Lorrain* du 30 juin 1921.

[1375] *Ibid.*

[1376] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Colonel commandant 153e Régiment d'Artillerie au Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace-Lorraine. Commissaire Général de la République à Strasbourg. Ministre de la Guerre n°21 – 5 juillet service récupération.

a)

EXPLOSION DE MUNITIONS ALLEMANDES

Depuis quelque temps, des artificiers font sauter par portions un énorme stock de munitions allemandes déposé près de la gare de Sarralbe, à trente kilomètres de Forbach. Par suite, croit-on, de l'imprudence d'un prisonnier russe occupé à ces travaux, le feu a pris dans un amas de fusées et s'est communiqué à une baraque contenant des bombes d'avion. Une explosion formidable s'est produite, causant des dégâts matériels très importants. Mais on ne compte pas de victimes.

b)

DES MUNITIONS ALLEMANDES FONT EXPLOSION EN ALSACE

SAARALBE, 17 juillet. — Un immense stock de munitions allemandes comprenant notamment des obus à l'hypérite, se trouve depuis l'armistice p ès de la gare de Saaralbe. Depuis quelque temps des artificiers font sauter des parties de ces munitions.

Hier matin, à la suite d'une imprudence commise, croit-on, par un prisonnier russe occupé à ces travaux de destruction, le feu a pris dans un stock de fusées et s'est communiqué rapidement à une baraque contenant des bombes d'avions. Vers 1 heure de l'après-midi une explosion qui a été entendue dans un rayon de plus de 20 kilomètres s'est produite.

Les travaux de sauvetage ont immédiatement été entrepris avec l'aide d'un détachement du 135e d'infanterie venu de Sarreguemines. Les dégâts matériels sont importants. Il n'y a pas eu de victimes.

c)

LES DEPOTS DE MUNITIONS DES FORETS DE MOSELLE

Metz, 5 mai (De notre correspondant part.) — Le semaine dernière, l'explosion d'un dépôt de munitions a mis en danger la population de Sarralbe, et l'opinion publique s'est émue en apprenant de cette façon qu'il existait encore des dépôts de munitions allemands dans notre département. Il y a, de fait, près de 400 tonnes d'obus à gaz allemands des plus récents modèles, hébergés dans les forêts du département de la Moselle. Pour prévenir la répétition de l'accident de Sarralbe, on vient de faire venir une centaine d'Allemands qui détruiront incessamment ces obus.

d)

Große Explosions-Katastrophe in Sarralbe.

Die Stadt in größter Gefahr.

Vor Schluß der Redaktion erhalten wir folgende telegraphische Nachricht:

Heute Freitag morgen entstand in dem Munitionspark am Bahnhof, in dem der Artilleriepark der früheren deutschen Armeeinspektion war und das ungeheure Lager von Munition in allen Arten, darunter die Hälfte Gasgranaten, birgt, ein Brand, der an den Leuchtkugeln entstanden ist. Das Lager hat eine ungeheuere Dimension und so war gleich das Schlimmste zu befürchten, was auch eintraf. Gegen 1 Uhr Nachmittags erfolgte eine gewaltige Explosion, die in einem Umkreis bis nach Saargemünd gehört wurde. Sämtliche Fensterscheiben der Stadt zersprangen und eine gewaltige Panik brach in der Stadt aus, da die Einwohner die furchtbaren Mengen der Gasgranaten, die jetzt schon 2 Jahre dort lagen, kannten. Der Brand dauert heute Abend noch immer an. Militär ist von allen Garnisonorten nach dort beordert, um die Gefahr zu unterbinden und das größte Unglück zu verhüten. Unermüdlich wird an der Abdämmung gearbeitet, denn der Brand findet reichlich Stoff an den über 300 zählenden Holzbaracken. Die Arbeiten sind furchtbar schwierig, da fortwährend Gefahr neuer Explosionen besteht. Bis heute abend ist ein 8 m. breiter Wallgraben ausgeworfen, um das Feuer auf seinen Herd zu beschränken; doch immer steht die Stadt in größter Gefahr. Vorkehrungen sind getroffen. 200 Eisenbahnwagen stehen bereit, um beim ersten Glockenschlag die Einwohner abzutransportieren. Die Leuchtkugeln entzündeten 12 Fliegerbomben, welche die Ursache der großen Explosion wurden, wodurch der Brand eine ungeheuere Dimension annahm. Die Hauptarbeit der Truppen geht nur dahin, die Gaslager nicht zur Explosion kommen zu lassen.

Abends 7 Uhr. — Nach den letzten Nachrichten hat die Gefahr, welche die Stadt bedroht, abgenommen, obschon sie noch nicht gänzlich verschwunden ist. Die zur Hülfeleistung aus Sarreguemines herbeigezogene Kompagnie des 135. Inf.-Regts. arbeitet an der Eindämmung des Hauptherdes im Walde zwischen Sarralbe und Dermingen angestrengt weiter. Eine gewisse Anzahl Einwohner ist in der Richtung Püttlingen geflüchtet. Die den ganzen Nachmittag aufeinander folgenden Explosionen sind weniger häufig geworden.

e)

La République n. 24 — 21. N°. 117.

Explosion im Munitionspark bei Saar-Union.

(Von unserem nach dem Tatort entsandten Spezialberichterstatter.)

Weithin vernehmbare Detonationen. — Panik in Keskastel.

Keine Menschenopfer.

Saar-Union, 28. April, 11 Uhr abends.

Heute nachmittag um 3.15 Uhr ertönte plötzlich in dem zwischen Schopperten, Keskastel, Saaralben und Berlinghem gelegenen Munitionspark eine furchtbare Explosion, durch deren Luftdruck die Fenster der obgenannten Ortschaften und teilweise auch diejenigen in Saar-Union zertrümmert wurden. Die Explosion erzeugte unter der Bevölkerung im ersten Momente eine Panik, die in Keskastel einen Teil der Bevölkerung zur Flucht bewog, und die wolkenhoch stieg, als bald darauf eine zweite aber minder starke Explosion erdröhnte. Die Bevölkerung in weitem Umkreise lebte für einige Stunden unter dem Eindruck einer kommenden Katastrophe und beruhigte sich auch nicht ganz, als die Nachricht durchsickerte, daß kein Anlaß zu ernstlicher Besorgnis vorliege. Man beschuldigte vor allen Dingen die Explosion von Gasgranaten.

Ursache und Wirkung.

Die Explosion der beiden Munitionsdepots ist auf einen Waldbrand, bei dem das verbrennende Element auf einer Fläche von 40 Hektar im Unterholz und Laubwerk bis an den Munitionspark heran näher trat, zurückzuführen. Die Ursache des Brandes ist unbekannt, jedoch sollen ähnliche Brände in letzter Gegend schon wiederholt festgestellt worden sein. Das Feuer erreichte zunächst das Depot mit 600 Granaten, deren Explosion das erste Depot nach sich zog. Ein 25 Meter breiter und 8 Meter tiefer Granattrichter wurde von dem furchtbaren Zerstörungswerk [illegible] Bald erlangten die Flammen auch an das zweite Depot mit 300 Granaten. Die benachbarten [illegible] Kisten. Die Entzündung erfolgte [illegible] und allein durch das Feuer und nicht, wie angenommen und behauptet wurde, durch Uebertragung des Abschlusses von Depot zu Depot. Versicherungen der anwesenden Offiziere [illegible] daß die einzelnen Depots in einer Entfernung von [illegible] 50 Meter voneinander [illegible] sind. — Nachtruhebetten erzielten [illegible] alle Maßnahmen, um dem Feuer einen Damm zu setzen und seine weitere Berührung mit anderen Munitionsdepots zu verhindern, was ihnen auch gelang. Nach Angabe der mit der Wiederfassung betrauten Offiziere wäre eine Explosion der Gasbombendepots nicht so erschreckend, wie gemeinhin angenommen wird, da die Gasbomben nur auf beschränkte Distanz wirkten, eine Angabe übrigens, von der wir nie die Probe auf das Exempel gemacht. Für heute sind keine Menschenleben zu beklagen.

Der Präfekt des Departements, Herr Allies und eine aus einem Offizierkorps bestehende Abordnung des Generalkommissariats sind an der Unfallstelle erschienen.

Pyrrhus und Epilog.

Bekanntlich war in der letzten Generalratssitzung die Rede von diesem aufsehenerregenden Munitionspark bei Saarunion und im Anschluß daran, an verschiedene andere noch nicht beseitigte Munitionsdepots aus dem Kriege. Wir haben seinerzeit auf die scharfsinnige Rede unseres Generalrates, Herr Kircher, Maire von Saar-Union, hin, leitet die Rechtsfrage, durch welche, wie sich Herr Kircher damals ausdrückte, 20000 Menschen beständig auf einem Pulverfaß sitzen, aufs entschiedenste verurteilt. Was in dieser Sache heraufzuführen ist, läßt sich heute nicht feststellen, jedenfalls nicht viel. Es bleiben bloß die bekanntgebenden Mitteilungen der militärischen Behörden vor, daß keine Gefahr besteht und daß mit den Aufräumungsarbeiten begonnen ist. Herr Kircher hatte sich auf die Interpellation des Herrn Kircher hin mit dem für den Park aufständigen Gouvernement militaire in Verbindung gesetzt und dort ist die Angelegenheit heute so weit gediehen, daß die „Fundation der Stadt von Saar-Union" in Verhandlung getreten wurde. Da aber in ganz Elsaß-Lothringen 35 000 Tonnen solcher „Kriegsandenken" zurückgelassen sind, wird ihre Beseitigung notwendigerweise noch lange Zeit in Anspruch nehmen, wenn nicht [illegible] solche Anschlüsse wie heute der Werk des [illegible] Zufalls ist. Jedenfalls ist die [illegible] Voraussicht, [illegible] Bevölkerung vor Gefahren zur Verhütung der Realisierung verhütende Wachsamkeit. Nur ohne dieselbe konnte das Feuer heute unschädlich [illegible] bis in die Gefahrzone vorbereitet [illegible] bringen.

Figure 194 : Explosions accidentelles au Bois de Lorraine. Coupures de presse a) Le Journal des débats politiques et littéraires du 19 juillet 1920 au sujet de l'explosion du 16 juillet 1920, b) c) L'Intransigeant du 7 mai 1921 au sujet de l'explosion du 28 avril 1921[1377], d) Article germanophone au sujet de l'explosion du 28 avril 1921. Source non renseignées, e) La République n° 117 du 29 avril 1921 au sujet de l'explosion du 28 avril 1921[1378].

[1377] a), b), c) Bibliothèque nationale de France.

[1378] d), e) Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402.

4.4.8 Juillet 1921. Sortir de l'ornière de toute urgence

En juillet 1921 une solution fut trouvée (selon le lieutenant-colonel Chardon, commandant le PAR de Metz et le Ministère de la Guerre) pour sortir urgemment de cette impasse mosellane. L'option d'un recours à la réquisition d'office des terrains du Bois de l'Hôpital, potentiellement possible par la réglementation française pour les opérations de démolition de munitions d'intérêt publique, ne fut pas retenue. L'Etat ne s'opposa pas, selon les fonds d'archives consultés, aux Hospices de Metz en imposant l'installation de l'usine SLPI sur ses terrains et ne se plia pas à ses exigences financières. Le droit local fut possiblement respecté et prévalut sur la réglementation nationale française. La SPLI fut rendue adjudicatrice d'un nouveau marché signé avec le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks. Ce marché fut approuvé en juin 1921[1379]. Son objet était la démolition des munitions du territoire de la Moselle (et en particulier des grands dépôts du Bois de Lorraine et du Bois de l'Hôpital) à Kelsterbach, en Rhénanie (Land de Hesse en Allemagne occupée, secteur français) sous le contrôle de l'Armée du Rhin. Les dépôts mosellans du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine, non détruits par les militaires furent transportés pour être détruits en Allemagne. D'autres munitions issues du dépôt de rassemblement de Sissonne, dans l'Aisne, saturé, furent aussi expédiées à l'usine de Kelsterbach.

C'est ici que l'histoire de la sortie de guerre du TAL se raccorde à celle de l'Allemagne. Alliés et Allemands se battirent sur le sol français, s'opposant, ils partagèrent toutefois en ce qui concerne la gestion des restes de guerre une histoire commune (cf. Section 10h du présent manuscrit).

4.4.9 Démolition des dépôts de munitions ex-allemands sur le Territoire de Lorraine. Synthèse

Les données chiffrées rassemblées dans le graphique de la Figure 195 sont issues des bulletins d'avancement des démolitions des munitions ex-allemandes produits par le Parc Régional d'Artillerie de Metz (6e Corps d'Armée) en exécution des prescriptions de la lettre n°802 A/M du 29 septembre 1921 du Commissaire Général de la République et de la transmission n°4000 MT / I du 1er octobre 1921 de Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine. Les bulletins conservés aux archives départementales du Bas-Rhin à Strasbourg sous la cote 121 AL 408 sont incomplets et ne couvrent pas tous les mois durant lesquels, à compter du second semestre 1921, les démolitions des projectiles furent engagées. Ils donnent toutefois à voir le rythme quasiment linéaire suivant lequel les stocks ex-allemands furent résorbés, d'environ 40 tonnes par jour (1 200 tonnes par mois en moyenne). Ces dépôts furent quasiment liquidés en 33 mois.

Mais comme nous allons le voir à présent, l'histoire des munitions anciennes ex-allemandes délaissées par les troupes impériales en 1918 sur le Territoire d'Alsace-Lorraine déborda les années 20 car rejoua dans les années 30. L'intégralité de ces munitions ex-allemandes ne fut pas neutralisée, une partie des engins furent réservés et mis en dépôts comme cela est développé dans le chapitre § 5 qui suit.

[1379] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

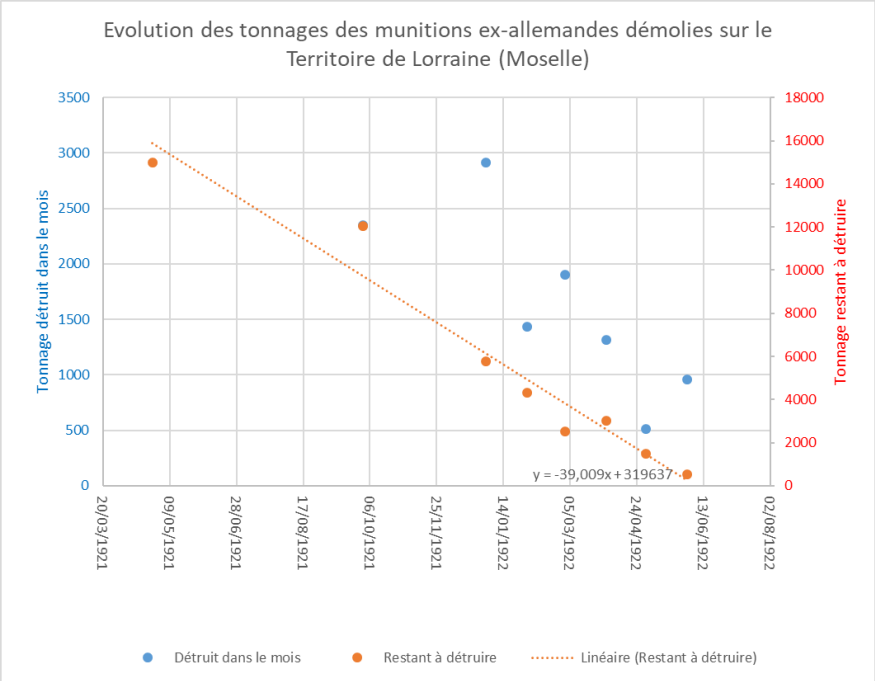


Figure 195 : Evolution des tonnages des munitions ex-allemandes démolies sur le Territoire de Lorraine

5. Reprise des surplus ex-allemands de la Grande Guerre. Trait d'union d'une guerre à l'autre

Dans les années 30, la montée en puissance de l'Allemagne nazie et la remilitarisation outre-Rhin, rappellèrent l'impérieuse nécessité pour la France de redéfendre les frontières nord-est du pays. L'Armée française, sur la défensive, envisagea dès 1925 la construction d'une ligne de « fortifications permanentes » (« régions fortifiées ») faisant face aux frontières allemandes, s'étendant de la Belgique à la frontière franco-suisse, et destinée, en cas d'attaque allemande à garantir l'intégrité du territoire national, à économiser les troupes et compenser les classes creuses causées par la Première Guerre mondiale. La construction de la première tranche de la ligne dénommée « ligne Maginot » (du nom du Ministre de la Guerre, André Maginot), s'activa jusqu'en 1933, date à laquelle le gros œuvre des principaux ouvrages fut achevé.

5.1.1 Réfectionner les munitions ex-allemandes pour alimenter les pièces d'artillerie de fortification ex-allemandes

Les sites du MA3 d'Illkirch- Graffenstadten et du Bois de l'Hôpital continuèrent a être exploités par respectivement les PAR de Strasbourg (20e Région militaire) et de Metz (6e Région militaire) dans les années 30 pour la réfection de munitions ex-allemandes datant de la Première Guerre mondiale. Ces opérations sont décrites dans le rapport « *Réfection des munitions ex-allemandes stockées dans les places de Metz, Thionville et Strasbourg. 2e rapport de mission du Capitaine Grangier de l'Ecole de Pyrotechnie* » du 18 mai 1933[1380].

Les projectiles à réfectionner étaient ceux aux identifiants 10 Gr 14 et 15 Gr 14 et Gr88, tirés par les canons courts de 100 mm et les obusiers de 150 mm armant les places fortifiées de Metz et de Strasbourg.

[1380] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Réfection des munitions ex-allemandes stockées dans les places de Metz, Thionville et Strasbourg. 2e rapport de mission du Capitaine Grangier de l'Ecole de Pyrotechnie. 18 mai 1933.

Cette réfection était donc destinée à approvisionner les anciennes pièces d'artillerie allemandes des forts et groupements fortifiés (*Festen*), récupéres par l'Armée française lors du retour de l'Alsace et de la Moselle à la France au moment de l'armistice. C'était le cas notamment pour les batteries des Paysans et d'Altenheim installées sur affût non protégé sur les rives du Rhin. Ces batteries d'artillerie anciennes ne pouvaient tirer que des obus qui avaient été conçus pour ces pièces, à savoir des engins ex-allemands, notamment ceux en réserve provenant des surplus allemands délaissés sur le TAL par les Allemands en 1918. Ce rapport indique aussi que parallèlement à la mise en place d'une organisation pour réfectionner les munitions, il fut impératif de rechercher des solutions pour armer de façon pérenne ces positions d'artillerie, les munitions ex-allemandes de la grande Guerre stockées par les PAR étant en nombre fini. Les inspecteurs de l'Ecole de Pyrotechnie soulignèrent en effet que soit posée la question du réapprovisionnemnt ultérieur des pièces d'artillerie allemandes des forts de Metz et Strasbourg. Ces groupements fortifiés réarmés devaient très certainement intégrer le dispositif défensif fortifié de la ligne Maginot (des régions fortifiées de Metz et de la Lauter).

Une inspection des dépôts de munitions des deux PAR par les artificiers de l'Ecole Centrale de Pyrotechnie de Bourges conduisit à des instructions et à la priorisation des réfections. Ainsi, la réfection des munitions ex-allemandes fut effectuée dans l'ordre suivant : obus de 100 mm (Gr15, Schr. 96, Gr14) puis obus de 150 mm (Gr88, Gr14 et Gr 14 m.v.F). Cet ordre d'exécution était par ailleurs aussi valable pour le désamorçage des obus encore munis de fusées allemandes. 80% des obus de 150 mm Gr14 désamorcés par le PAR de Metz ne purent être réfectionnés du fait du mauvais état de la cartouche amovible (gaine d'éclatement), déchirées et adhérant fortement à l'explosif. Par ailleurs, une couche épaisse ayant l'aspect de rouille, renfermant possiblement des picrates, était aussi visible à l'œil de certains obus. Ces engins n'avaient plus qu'une seule vocation envisageable : leur destruction.

5.1.2 L'atelier de réfection des munitions anciennes du Bois de l'Hôpital

La mise en route de l'atelier de réfection du Bois de l'Hopital était prévue le 1er juin 1933. 50 à 60 personnes, manœuvres et encadrants (officiers et sous-officiers) étaient affectés à cet atelier. Les travaux effectués étaient (i) la réfection des projectiles (dont le dérouillage, le peinturage, le marquage et le lotissement des obus) et (ii) le désamorçage (à hauteur de 1 500 obus par mois au moyen de deux équipes).

Le nombre de projectiles traités par le Parc Régional de réparation et d'entretien de Metz (au Bois de l'Hôpital au fort Sommy et à la batterie Moselle) était de 33 396 pour les engins explosifs et de 20 793 pour les obus à balles. 25 245 obus explosifs et 18 433 obus à balles furent réfectionnés. Ont détruisit ainsi 6 646 obus explosifs et 2 230 obus à balles (au 20 avril 1933). 20 000 obus étaient encore à désamorcer au démarrage de l'atelier de réfection. Le taux de destruction par rapport aux munitions initialement visées par les réfections est de 16%, le taux de destruction le plus élevé concerne les munitions explosives (celles présentant les plus grands risques de picratation) (cf. Tableau 26).

	Réservés	Détruits	Réservés	Détruits
Obus explosifs	33 396	6 646	61,6%	19,9%
Obus à balles	20 793	2 230	38,4%	10,7%
Total	**54 189**	**8 876**	**100%**	16%

Tableau 26 : Taux de munitions détruites parmi les munitions visées par les réfections par le parc régional de réparation et d'entretien de Metz[1381].

[1381] D'après Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR9 NN 3-675, *op. cit.*

Le rendement de l'atelier était d'environ 6 000 obus réfectionnés par mois pour la période du 1er juin au 1er novembre 1933, passant à 3 000 unités par mois durant la période hivernale postérieure au 1er novembre 1933. Les obus provenaient des stocks des groupement fortifiés de Metz, de Verdun, de Thionville (Koenigshacker, Illange, Guendrange). Le rapport mentionne l'existence d'un terrain de destruction du PAR de Metz. Ce champ d'éclatement n'a pu être localisé sur la base des archives consultées dans le cadre de cette recherche.

L'histoire du site du Bois de l'Hôpital ne s'arrêta pas là. La *Wehrmacht* occupa le Bois de l'Hôpital dès la prise de Metz en 1939 et prit aussi possession des anciens forts Serré de Rivière situés en bordure est et au sud-ouest du bois. D'abord désarmés par les Allemands, ils furent à nouveau équipés à l'approche des troupes américaines en 1944. Les Allemands installèrent au Bois de l'Hôpital un important dépôt de munitions. Ces forts furent intensément pilonnés et bombardés par l'artillerie et l'aviation américaine d'octobre à décembre 1944 durant la violente bataille de Metz. Le dépôt de munition brûla pendant deux jours, alors qu'un impact de bombe *Yankee* provoqua une formidable explosion. L'un des forts fut litéralement pulvérisé. Il stockait de nombreuses ogives de fusées V2 (embarquant chacune une tonnes d'explosifs hautement énergétiques). Ce site du Bois de l'Hôpital fut encore exploité après la Seconde Guerre mondiale pour le stockage, la refection puis la destruction de munitions.

5.1.3 L'atelier de réfection des munitions anciennes du MA3

Concernant l'atelier de réfection du MA3 d'Illkirch-Graffenstaden, l'organisation de la réfection était plus simple qu'à Metz car les munitions, en quantités sensiblement moindre, étaient beaucoup moins disséminées et étaient en grande partie déjà désamorcées. Ces stocks furent complétés par les munitions à réfectionner entreprosées au fort de Mutzig. 18 hommes exécutèrent les opérations de réfection des projectiles à hauteur de 2 500 unités par mois, à compter du 15 juillet 1933. Comme à Metz, la priorité fut donnée à la refection des munitions pour le canon de 100 mm.

L'officier du PAPS, qui dirigeait la réfection fut formé dans les ateliers de réfection de Metz, ces derniers ayant démarrés plus d'un mois avant celui de Graffenstaden. Le nombre de munitions de 10Gr15 et 10Schr.96 réfectionnés en 1933 par le site strasbourgeois serait d'environ 9 000.

6. Résumé et conclusions de la Section 9h

En novembre 1918, après 48 ans d'administration allemande, les territoires anciennement annexés du *Reichsland Elsaß-Lothringen (« Etat impérial* d'Alsace-Lorraine », correspondant aux actuels départements du Bas-Rhin, du Haut-Rhin (Alsace) et de la Moselle (Lorraine)), revinrent à la France conformément à l'Article II de l'armistice du 11 novembre 1918. Ils furent regroupés dans le Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL), découpé entre les 7e et 21e Régions militaires. Les troupes françaises entrèrent ainsi à Mulhouse le 17 novembre, à Colmar le 18 novembre, à Metz le 19 novembre et le 22 novembre 1918 à Strasbourg. La foule en liesse accueillit les libérateurs, pleine d'espérance pour un avenir meilleur dans un éblouissement tricolore. En quinze jour, la déferlante « bleu horizon » sembla avoir balayé plus de deux générations de présence et de régime allemand. Mais ces apparences n'étaient qu'illusion car en Alsace-Lorraine, plus qu'ailleurs, l'après-guerre allait s'avérer être tout aussi complexe à solutionner que le temps de guerre. L'éblouissement des premiers instants, chargés d'affect, laissa place à une déception des attentes, à une morosité, voire à une défiance à l'égard de l'administration imposée par Paris qui semblait faire fi des singularités linguistiques et culturelles de ces territoires.

Une administration transitoire, avec à sa tête le Commissaire Général de la République, fut installée à Strasbourg. Ce « malaise alsacien-lorrain » infusa rapidement la société lorraine et plus intensément encore alsacienne à partir du printemps 1919. La situation administrative entre 1919 et 1925 resta complexe, confuse du fait de l'imbrication des prérogatives, responsabilités et compétences des autorités civiles et militaires d'une part et l'interpénétration du droit français central et du droit local (dont au niveau communal de législations héritées de l'administration allemande) d'autre part. Les chevauchements réglementaires et les incohérences décisionnelles étaient inévitables. Tout se fit dans l'urgence et par tâtonnements. Les administrations et les autorités civiles locales retrouvèrent leur pleine légitimité après plus de 40 ans de régime allemand, achevé par un temps de guerre de quatre ans, éprouvant, sous une dictature militaire totale, durant laquelle les populations eurent à subir les rationnements, les séquestrations, la répression et des expulsions incessantes. Il s'agissait aussi pour l'administration française de reprendre ses droits après la période de guerre durant laquelle l'autorité militaire était omnipotente.

C'est dans ce contexte socio-politique si singulier que s'inscrivit dans le TAL la question et les enjeux inhérents aux Restes Explosifs de Guerre (REG) et autres surplus délaissés par les Allemands, qui se déclinèrent en deux problématiques majeures dissociées selon les secteurs géographiques concernés (i) les dépôts de munitions localisés dans la plaine d'Alsace et en Moselle, puis (ii) les anciens champs de bataille principalement situés sur les hauteurs du massif des Vosges. La résolution dans l'entre-deux-guerres de l'urgence de la liquidation des engins ex-allemands abandonnés au droit du TAL mit à l'épreuve la nouvelle autorité parachutée depuis Paris, dont les déficiances vinrent alors jeter de l'huile sur le feu d'un mailaise alsacien-lorrain endémique depuis 1918.

Environ 33 000 tonnes de projectiles organisés en une cinquantaine de dépôts, parmi lesquels quatre dépôts majeurs qui se distinguaient par leurs dimensions: (i) le dépôt du Bois de l'Hôpital au sud-est de Metz (département de la Moselle), (i) du Bois de Lorraine à Keskastel et Schopperten (département du Bas-Rhin, mais dépendant du PAR de Metz), (iii) du MA3 (*Munitionsanstallt n°3*) en forêt d'Illkirch au sud de Strasbourg (département du Bas-Rhin) et (iiii) du très vaste dépôts d'obus explosifs et chimiques de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*) à l'est de Mulhouse (département du Haut-Rhin). Ces tonnages très importants de munitions, matériels et matières explosibles et toxiques avaient été abandonnés en plaine et en moindre mesure au niveau de certains cols du massif des Vosges en novembre 1918. Il s'agissait pour l'essentiel de secteurs habités par une population rurale installée sur des sols riches à vocation agricole. Ensuite, les violents duels d'artillerie ne concernèrent dans le TAL que certains

secteurs particuliers et sur des aires géographiques restreintes, principalement dans les Haute-Vosges (Haut-Rhin) et durant l'année 1915 (secteurs de la Tête des Faux, du Lingekopf, du Reichsackerkopf, de l'Hartmannswillerkopf, etc.). Là, sur les hauteurs, des engins tirés ou non (épars ou en amas) furent introduits sur et dans les sols à la faveur des combats. Ces hauts chaumes étaient faiblement peuplés, par une population (marcaire) dispersée pratiquant l'élevage (pâture) et l'exploitation du bois. Les secteurs historiques des batailles du Lingekopf et de l'Hartmannswillerkopf allaient aussi être sanctuarisés et être fréquentés par une population de touristes de la mémoire dans l'immédiat après-guerre. Ces secteurs montagneux étaient contrairement à ceux de la plaine escarpés et difficiles d'accès. La liquidation des stocks ex-allemands en plaine constitua donc aux yeux des autorités militaires et civiles, dans le cadre des reconstructions, comme un enjeu prioritaire pour libérer les sols agricoles des matériels dangereux et encombrants installés là d'office par les Allemands durant la guerre et protéger les populations des dangers inhérents aux REG. L'éradication de ces reliquats explosifs de guerre, c'était non seulement restaurer, pour les propriétaires de terrains qui avaient été réquisitionnés d'office, de restaurer la libre jouissance de leur bien, mais aussi liquider la guerre et possiblement aussi plus symboliquement parachever la « débochisation » du TAL. Quelques dépôts français furent également visés par les opérations de récupération et de désobusage.

A l'automne 1919, des discussions s'engagèrent entre la direction du Service Central des Dommages de Guerre et de la Reconstitution, le Commissaire Général de la République, le commandement de l'Artillerie et la préfecture du Haut-Rhin, principal département du TAL concerné par les combats de 1914-1918 et le Service du désobusage. Contrairement aux autres Régions militaires concernées par les combats de la guerre 1914-1918 (1er, 2e et 6e Régions militaires), le Ministère de la Guerre et celui des Régions Libérées, ne jugèrent pas nécessaire à recourir à des entreprises privées sous contrat pour la récupération et le désobusage sur les anciens champs de bataille du TAL. Jusqu'à octobre 1919, les opérations de désobusage furent effectuées en Alsace par le personnel de l'Artillerie sous les ordres du Général Commandant de l'Artillerie du Territoire d'Alsace (GCATA) (général Fetter) et des Commandants des Corps d'Armée stationnés sur le Territoire (VIIe et XXIe Corps).

Les artilleurs reçurent dès décembre 1918 une série d'instructions émanant du GQG, partagées avec les autres régions militaires, propres aux munitions françaises comme ex-allemandes, pour la récupération des REG, leur rassemblement dans les grands dépôts (à réorganiser) voire leur démolition lorsque leur état de conservation était douteux et leur transport jugé trop risqué. Des munitions éparses furent pétardées sur place par les artilleurs tandis que des terrains de destruction par explosion furent exploités par l'Artillerie à proximité de certains dépôts. D'autres instructions particulières étaient spécifiques au TAL et sa nouvelle position géographique et militaire au sein des frontières françaises. Le TAL redevint en effet en novembre 1918 le glacis de l'Allemagne et un territoire frontalier résolument tourné vers l'est. La Direction de l'Artillerie demanda explicitement de conserver et réserver des projectiles de la Grande Guerre pour « des usages ultérieurs » comme (i) la dotation de l'Armée du Rhin occupant une partie de la rive gauche du Rhin en Rhénanie, (ii) le soutien militaire français des armées engagés en Europe de l'Est dans des guerres d'affirmation nationale, suite à l'effondrement des empire centraux, comme en Pologne ou en Tchécoslovaquie, et les campagnes engagées pour faire front au bolchevisme, (iii) le renforcement des défenses de l'est par l'armement des pièces d'artillerie ex-allemandes des places fortes (*Festen*) modernisées puis abandonnées par les Allemands.

En 1920, avec la démobilisation des hommes sous les drapeaux, dont les artilleurs en charge du désobusage, se posa en Alsace et en Moselle la question centrale de la gouvernance des opérations, civile ou militaire, de la main d'œuvre nécessaire à sa réalisation. L'autorité préfectorale insista afin que les destructions soient effectuées par des personnels artificiers militaires, pour des raisons de compétence et de fiabilité.

En 1921, ces opérations furent placées sous la responsabilité des personnels militaires de l'Artillerie (Parc Régional d'Artillerie de Metz et de la Place de Strasbourg (PAPS)), parfois aidés par des artificiers civils. Les projectiles signalés par les habitants et forestiers étaient détruits sur place lors de tournées organisés par les artificiers. Mais le désobusage, opéré principalement dans les régions boisées et montagneuses des Vosges, resta superficiel, poussif et partiel du fait de la faiblesse des moyens humains et matériels alloués par l'Armée, de l'escarpement des terrains à nettoyer et de la rapidité avec laquelle la végétation reprit ses droits. Des campagnes préventives d'information sur les risques associés aux engins de guerre abandonnés par voie d'affichage public (bilingue) furent réalisées pour renforcer la protection de la population, ce qui n'empêcha pas la survenue d'accidents souvent mortels. Cette organisation du désobusage fut à nouveau révisée dans les années 30, par l'implication active, en appui aux artificiers de l'artillerie des personnels forestiers des Eaux & Forêts et des personnels de la Gendarmerie.

L'Artillerie n'était pas en mesure de détruire dans un temps très court les vastes dépôts du TAL. Les autorités centrales parisiennes avec d'une part le Ministère de la Guerre et d'autre part le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks (dépendant du Ministère des Finances) cherchèrent à mettre en place dans le TAL un schéma organisationnel et un *modus operandi* pour la liquidation des stocks ex-allemands similaires à ceux mis en œuvre par ces mêmes services et ministères ailleurs en France pour éliminer des surplus. Il s'agissait alors, faute de moyens militaires, de conclure des marchés avec des entreprises privées par voie d'adjudication, suite à un appel d'offre ou plus généralement, dans l'immédiat après-guerre, en gré à gré vers des entreprises réputées avoir les compétences requises en matière de récupération, de ferraillage et de neutralisation d'engins de guerre. Les opérations de destruction étaient placées sous le contrôle technique de l'autorité militaire, par l'entremise des Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR). Les dépôts étaient cédés à ces entreprises qui, après neutralisation et rebutage des engins de guerre, récupéraient les matières valorisables constitutives, pour les revendre, les écouler dans le circuit économique, moyennant un versement à l'Etat (propriétaire des munitions, butin de guerre) d'une redevance forfaitaire indexée sur la tonne de métal.

La liquidation de surplus ex-allemands fut dans le TAL très précoce comparativement aux opérations similaires engagées par voie contractuelle dans les autres régions militaires concernées par la Grande Guerre. Il s'agit vraisemblablement d'une conséquence de l'absence d'urgence dans le TAL à avoir à nettoyer les anciens champs de bataille isolés et relativement peu bombardés, permettant à l'Artillerie de concentrer ses moyens sur la priorité, c'est-à-dire la liquidation en plaine des vastes dépôts ex-allemands.

Dès 1919, soit moins d'un an après l'armistice du 11 novembre 1918, le Ministère de la Guerre et le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks passèrent des contrats respectivement militaires et civils vers des entrepreneurs privés pour la démolition des dépôts de munitions abandonnés sur le TAL.

Le 7 juillet 1919 avec l'entreprise Clere & Schwander (« *Société anonyme de récupération de munitions* »), pour l'élimination des dépôts chimiques et explosifs ex-allemands de la forêt de la Hardt (*Hartwaldlager*), le 15 juillet 1920 avec Bouxin pour le traitement sur le *Munitionsanstallt 3* (MA3) des obus et bombes de tranchées explosifs issus des dépôts ex-allemands essentiellement implantés dans le Bas-Rhin et en moindre mesure dans le Haut-Rhin. La Société Lorraine des Produits Industriels (SLPI) fut déclarée adjudicataire du marché de destruction des munitions du territoire de Lorraine (actuel département de la Moselle) en septembre 1920, pour la destruction des dépôts du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine.

Les procédures de gré à gré semblèrent avoir été retenues pour ces marchés publics, pour répondre aux nécessités de l'urgence et au caractère exceptionnel de ces opérations. Il s'agissait d'opérations « extraordinaires » du temps de paix, jamais encore entreprises à cette échelle, visant des objets et des affaires militaires héritées du temps de guerre et de l'occupation allemande.

La démolition contractuelle de ces dépôts s'effectua en Alsace dans des délais relativement courts, usant de méthodes pratiquées par ailleurs pour décharger et neutraliser les munitions et récupérer les matières valorisable, (i) pétardement (*Open Detonation*) des engins jugés dangereux et indémontables, (ii) désamorçage et dé ceinturage pour neutraliser les fonctionnalités militaires et récupérer le cuivre et le zinc, (iii) vidage des chargement explosifs par fusion à l'eau chaude, (iiii) brûlage à l'air libre (*Open Burning*) des explosifs et munitions chimiques. Dans la Hardt, un procédé bien particulier fut utilisé par vidanger « en toute sécurité » les obus chimiques à chargement liquide : la trépanation (perçage) des enveloppes des obus et l'infiltration sous terre dans des puits « perdus » des toxiques de guerre, un mode opératoire qui souleva chez l'autorité préfectorale des inquiétudes environnementales par rapport au risque de pollution de la nappe phréatique d'Alsace. Clere & Schwander procéda aux démolitions par séquences de travail successives, chacune d'elles visant une catégorie de munitions et matériels, agencées par ordre d'urgence. Les munitions chimiques furent déchargées en dernier lieu car nécessitant des études préalables spécifiques laissées à l'approbation du Ministère de la Guerre.

Deux à trois années furent nécessaires à Clere & Schwander et Bouxin pour parvenir à leurs fins, des années jalonnées par de multiples obstacles et difficultés. Ils furent d'abord administratifs, les chantiers ayant été ouverts sans aucune autorisation réglementaire préalable, normalement impérative pour des opérations industrielles dangereuses du temps « ordinaire », que ce soit au titre des installations industrielles dangereuses, insalubres ou incommodes (loi du 17 décembre 1917) ou encore de la réglementation des Eaux & Forêts. L'administration civile chercha à régulariser le statut réglementaire des opérations dans un après-coup lorsque les opérations initialement urgentes semblèrent s'inscrire dans la durée. La démultiplication des incendies, explosions, intoxications, forcèrent les autorités à chercher, autant que faire se peut, un cadre réglementaire pour notamment fixer clairement les responsabilités. Des compromis furent trouvés en Alsace entre le PAPS, le Commissariat Général de la République et les industriels pour ne pas entraver la bonne marche de ces opérations et afficher une position de garant de la protection des populations.

A Illkirch, Bouxin eut à pâtir bien magré lui d'un litige qui opposa la commune à l'autorité militaire au sujet des dédommagements (indemnisations) réclamés par la mairie pour le préjudice de l'occupation du terrain communal du MA3 réquisitionné en 1916 par les Allemands. Ce litige est un exemple et un révélateur de la fracture nette entre les autorités civiles locales qui cherchèrent à s'affirmer et les militaires qui se retiraient. Le maire d'Illkirch engagea une démarche de demande d'indemnisation auprès de l'administration française dès mars 1919 en cherchant l'appui du conseiller général du Bas-Rhin Georges Weill, opposant socialiste au Commissariat Général de centre- droit.

Au terme de 33 mois d'échanges épistolaires entre la commune et diverses strates des autorités civiles et militaires, régionales et centrales, pour une prise de décision sur un litige et un règlement d'une situation héritée du temps de guerre et du temps allemand, ce fut le *statu quo*. Le courrier (Lettre mémoire du 7 janvier 1922 de Monsieur le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin) avec sa description chronologique minutieuse des échanges, met en exergue l'immobilisme d'une administration française, et des décisions, qui, lorsqu'elles sont prises, peuvent apparaître dénuées de sens logique au regard des préoccupations locales. La multiplication des interlocuteurs auxquels s'adresse la commune témoigne de la nébuleuse administrative installée par les Français en Alsace mais aussi l'impuissance des élus locaux face aux règlements des questions de l'occupation allemande et l'omniscience de l'autorité militaire qui semble faire fi des questions et des droits civils. Ces situations entretiennent un climat de défiance des civils d'Alsace et des pouvoirs civils locaux à l'égard des nouvelles structures décisionnelles et administratives importées par la France reprenant possession, après plus de 40 ans d'administration allemande, des anciens territoires d'Alsace-Lorraine. L'Armée accorda 3 000 francs à la commune, ce qui représentait environ trois mois de loyer de Bouxin qui démolissait le dépôt ex-allemand dans des conditions, vue de la commune, rémunératrices. Lorsque Bouxin demanda à étendre son chantier pour brûler sur une aire située au sud du MA3 des explosifs, le refus de la commune fut en juin 1922, sans surprise, catégorique. Il s'agissait aussi d'explosifs ex-allemands, non réglementaires en France et qu'il ne fut pas autorisé à écouler sur le marché français.

L'opposition politique de gauche (SFIO) se saisit des conséquences dramatiques des incidents et accidents répétés, liés au non-respect des consignes de sécurité les plus élémentaires, qui émaillèrent l'exploitation du chantier Clere & Schwander de la Hardt et notamment l'explosion mortelle de juin 1920 et ses 14 victimes, pour dénoncer par voie de presse, la position des autorités se déchargeant de leurs responsabilités en confiant, par souci d'économie, ces opérations à des entreprises privées en quête de profit au détriment de la vie des ouvriers. Ces opérations furent aussi menées dans un climat anxiogène au sein de la population du nord-est de Mulhouse du fait des émanations gazeuses malodorantes, des incendies, qui laissaient planer la menace d'explosions catastrophiques et de nappes dérivantes de toxiques de guerre.

Dans la Hardt comme en forêt d'Illkirch, les industriels ne respectèrent pas les délais contractuels pour la démolition des munitions, ce à quoi l'Artillerie ne put remédier en hâtant les opérations par des pénalités et sanctions faute de clauses contractuelles les prévoyant. A la mi 1922, les dépôts du territoire d'Alsace avaient été tant bien que mal évacués et leurs terrains restitués. Ils devinrent des terrains militaires, champs de tirs et autres dépôts de munitions.

C'est en Moselle que la question du débarrassage des restes de guerre délaissés par les Allemands devint particulièrement critique, lorsque les opposants aux chantiers de destruction, faisant valoir le droit local, conduisirent ces opérations dans une impasse. La prise en main par la SPLI du dépôt de rassemblement du Bois de l'Hôpital et du dépôt du Bois de Lorraine tarda. Les craintes du général Berthelot se confirmèrent et les mises en garde du Commissaire Général de la République du 6 avril 1920 pleinement justifiées lors que les dépôts en question furent en proie à des incendies et ébranlés par des détonations, semant la panique et l'angoisse dans les populations avoisinantes. La SPLI entreprit de construire son usine au plus près du dépôt du Bois de l'Hôpital.

Le 28 avril 1921 le Bois de Lorraine fut à nouveau en partie ravagé par les flammes et explosions. Les échanges épistolaires entre le Commissaire Général de la République et le Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances se multiplièrent, les décisions tardèrent mais pas les accidents. Le 29 juin 1921, 25 000 obus explosèrent au sein du dépôt de rassemblement du Bois de l'Hôpital. Ces accidents précipitèrent les prises de décision en mettant en exergue l'urgence d'éradiquer ces dépôts.

La population alsacienne-lorraine, restée en grande majorité dans les arrières lignes allemandes, ne connut pas la guerre, les combats et ses destructions, mais quatre années d'austérité dures et de restrictions imposées par le *Reich* contrastant avec les années prospères d'avant 1914. Dépossédée de son destin, elle eut le sentiment de l'être à nouveau lorsque la France imposa en novembre 1918, depuis Paris, sa nouvelle administration transitoire, qui semblait faire fi des spécificités culturelles et linguistique de ces territoires. Les opérations de désobusage des sols et de liquidation des surplus de guerre ex-allemands dans le TAL, orchestrées par cette administration, avec leurs nuisances auxquelles cette population n'était pas préparée (détonations, fumées, etc.), mais aussi les incendies et explosions accidentelles de dépôts ex-allemands, hérités du temps de l'ancien occupant, semblant avoir été, comme ces civils, laissés à l'abandon, puis les morts, blessés et intoxiqués dans les chantiers de désobusage, ne firent qu'attiser un sentiment d'impuissance, la morosité d'une « malaise alsacien-lorrain » puis des positions de méfiance et de défiance des autorités civiles locales et des partis politiques de l'opposition de gauche à l'égard de l'administration jacobine de centre-droit. En Alsace-Lorraine, où furent maintenus des pans du droit local du régime allemand, fait unique dans le paysage du désobusage de l'entre-deux-guerres, Maires, Sous-Préfets et Préfets s'affirmèrent comme les réels garants de la protection des populations au plus près des préoccupations de leurs administrés. Toujours en première ligne au moment d'accidents, ils firent entendre leurs droits en s'opposant, par véto, aux décisions du Ministère de la Guerre, à l'érection puis à l'exploitation de chantiers de désobusage. Ces décisions politiques semblent être diamétralement opposées à l'objectif premier de la liquidation des dépôts de munitions : protéger les populations.

A Metz, le projet d'usine de démolition des engins du Territoire de Lorraine de la SPLI avorta suite à l'opposition des Hospices de Metz. Ainsi, pour sortir de l'impasse, ces munitions furent transportées en Rhénanie sur décision de Paris pour être démolies dans un usine franco-allemande, sous contrôle de l'Armée française à Kelsterbach (Land de Hesse, à proximité de Francfort-sur-le-Main). La SPLI fut rendue à cet effet adjudicatrice d'un nouveau marché signé avec le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks. Il n'y eut aucune démarche de l'administration française qui cherchât à s'opposer à cette décision. *Not In My Back Yard* (NIMBY[1382]) était la solution pour débarrasser les sols de Moselle des milliers de tonnes d'engins ex-allemands en déportant ces opérations polluantes et risquées sur le sol allemand.

L'Histoire des munitions ex-allemandes de la Grande Guerre du Territoire d'Alsace-Lorraine rejoua dans les années 30 lorsque la France perçut qu'il fallait renforcer les défenses de ses frontières est face à l'Allemagne. Les fortifications ex-allemandes (*Festen*) récupérées par la France en novembre 1918 au même titre que les munitions dotant leur artillerie furent intégrés aux défenses de la ligne Maginot vers 1932. Les munitions ex-allemandes réservées par l'Artillerie française en 1918-1919 furent reprises, réfectionnées dans les ateliers du MA3 à Illkirch et de Metz (dont celui du Bois de l'Hôpital), pour doter les pièces des fortifications. Environ 54 300 projectiles, majoritairement explosifs, furent ainsi réfectionnés par le Parc Régional de réparation et d'entretien de Metz et l'atelier de réfection du MA3 d'Illkirch-Graffenstaden et en moyenne 16% des munitions initialement réservées furent détruites à Metz.

[1382] Désigne l'attitude qui consiste à approuver un projet pourvu qu'il se fasse ailleurs.

Section 10h
Loin du front et au-delà des frontières. Une histoire européenne de la liquidation des surplus et Restes Explosifs de Guerre.

1. Introduction de la Section 10h

On rappelle en préambule et comme cela a été décrit et explicité dans ce qui précède, que de grandes quantités de Restes Explosifs de Guerre (REG) d'une très grande diversité, ayant appartenu à toutes les parties belligérantes du front occidental, avaient été abandonnées sur et dans les sols de France et de Belgique durant la Première Guerre mondiale et surtout durant la phase de reprise de la guerre de mouvement et de retraite allemande à l'automne 1918. L'organisation des approvisionnements en munitions et de la logistique chez les Alliés comme chez les Allemands, la physionomie de la guerre marquée par la bascule soudaine d'une longue guerre des tranchées (de position) à la guerre de mouvement en juillet 1918, l'accroissement significatif des moyens, de la puissance de l'Artillerie entre 1914 et 1918, les opérations de récupération, de rassemblement ainsi que l'évolution des lignes de front, forgèrent une géographie des REG singulière dans l'immédiate sortie de guerre.

Des engins isolés, épars, tirés et non explosés (UXOs) ou non utilisés constellaient les anciens champs de bataille en particulier dans les secteurs très actifs du front ayant été marqués par d'importants et violents duels d'artillerie. D'autres matériels explosibles furent délaissés en amas ou dans de petits, mais nombreux, dépôts avancés plus au moins bien organisés aux abords des zones de combat. Certains dépôts avaient été positionnés sous terre dans des abris cavernes profonds ou encore dans des galeries des systèmes de guerre de mines. Il s'agissait *sensu stricto* de REG, endossant le statut de déchets de guerre s'ils étaient définitivement voués à l'abandon, à la destruction *post-bellum*.

Plus à l'arrière, dans les *hinterlands*, de vastes dépôts de munitions et autres matériels de guerre (rassemblés dans des dépôts de base et intermédiaires) avaient été installés sur les grands axes de communication (notamment les voies de chemin de fer à écartement normal) reliant le front pour les Français et les Corps expéditionnaires alliés, aux ports de la Manche, de l'Atlantique, aux Etablissements de Réserve Générale de Munitions (ERGMu), aux usines de production et de chargement de munitions. Ces centaines de milliers de tonnes de matériel en état de fonctionner, ne trouvant plus d'utilité dans de telles proportions lorsque cessèrent les hostilités, formèrent les surplus de guerre.

Ces surplus avaient été accumulés chez les Alliés à la faveur de l'arrêt soudain, non anticipé, des combats alors que les approvisionnements en munitions se poursuivaient. Différents facteurs (géopolitiques, militaires et juridiques) contribuèrent vraisemblablement dans l'entre-deux-guerres, au déclassement de munitions de 1914-1918 et donc à l'inflation des surplus de guerre, comme la démilitarisation de l'Allemagne, l'évolution du droit international sur la guerre proscrivant le recours aux munitions chimiques largement utilisées à la fin de la guerre, l'évolution des tactiques misant sur la manœuvre et le mouvement, reléguant au second plan le matériel de guerre de position (dont ceux de l'artillerie de tranchée). etc.

Les Alliés sortirent vainqueurs de cette guerre et mirent aussi la main sur les dépôts abandonnés par les Allemands qui, entre la rivière Marne et la frontière belge, avaient aussi abandonné sur et sous terre, précipité dans les cours d'eau, étangs et fossés, un tonnage vraisemblablement conséquent, bien qu'inconnu, d'engins de guerre. Enfin, dès novembre 1918, les Français recouvraient les anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine et avec eux les grands dépôts de munitions qui avaient été installés par les Allemands pour entretenir la guerre sur les fronts d'Alsace et de Lorraine (cf. Section 9h du présent manuscrit). Ces munitions par milliers de tonnes ne trouvèrent a priori aucune utilité au sein des armées alliées, bien au contraire, elles furent sujet de préoccupations.

La problématique du nettoyage des anciens champs de bataille et de la remise en état des sols dans le contexte des reconstructions concernait le quart nord-est de la France et l'ouest de la Belgique sur le front occidental. Celle de la liquidation des surplus de guerre, qu'ils soient français, allemands ou encore britanniques, intéressait l'intégralité des territoires des anciennes parties belligérantes.

La présente section s'attache à questionner les enjeux, motivations et les objectifs de la liquidation des surplus de matériels explosibles en excès, obsolètes, hors service dans l'entre-deux-guerres, puis à exposer les organisations mises en place à cet effet par toutes les parties concernées, les méthodes et moyens techniques mis en œuvre par les détenteurs des surplus pour solutionner ces problématiques. Cette section met plus particulièrement la focale, par une approche comparative, sur les points de convergence et de divergence dans l'approche retenue par chacun des pays ayant à faire face à ce défi partagé dans le contexte commun de sortie de guerre, à savoir la France, l'Allemagne, la Belgique. Quelques archives collectées à la faveur de cette recherche concernent la liquidation des surplus en Grande-Bretagne.

L'approche historiographique retenue ici ne cherche pas l'exhaustivité mais a été volontairement centrée sur quelques cas, rares, suffisamment bien documentés dans les archives pour apporter des éléments de réponse aux questions posées ci-dessus, mais se veut aussi suffisamment large pour être éclairante quant à la diversité des situations, des problématiques et des solutions apportées sur des secteurs géographiques très variés.

Les sites et situations exposées dans ce qui suit sont les suivants (i) la démolition des munitions excédentaires en Lombardie par l'Armée française en Italie, (ii) la neutralisation d'engins perchloratés et chimiques dans le grenoblois (département de l'Isère) (1918-1950), (iii) le noyage de grenades au lac bleu d'Avrillé (département du Maine et Loire) et de perchlorate d'ammonium dans la vallée de l'Arve (département de la Haute-Savoie), (iiii) le rassemblement et la destruction industrielle d'engins chimiques obsolètes à l'ERGMu de la Ferté-Hauterive (département de l'Allier), et enfin (iiiii) la démolition de projectiles de marine à Mézidon-Canon (département du Calvados).

Une sous-section originale est spécialement consacrée dans ce qui suit à la liquidation des stocks d'engins de guerre et de matières explosibles en Allemagne dans l'entre-deux-guerres (en distinguant, d'une part le cas des territoires occupés par les Alliés en rive gauche du Rhin, et d'autre part le cas des territoires non occupés au titre de la démilitarisation de l'Allemagne conformément aux clauses du Traité de Versailles. Cet historique général est illustré par les cas particuliers des sites de Kelsterbach (en Hesse, sous contrôle français), Hallschlag (dans l'Eifel, en Rhénanie-Palatinat, sous contrôle américain), Cologne (en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, sous contrôle britannique) et Zweedorf (en Meklenbburg-Poméranie, hors zone occupée).

Enfin, une autre sous-section est spécifiquement dédiée à la neutralisation des excédents de poudres et explosifs en Grande-Bretagne et à la liquidation des surplus britanniques et ex-allemands sur les sols français et belge par l'entreprise F.N. Pickett & Fils, le géant du désobusage industriel de l'entre-deux-guerres, en s'attachant à décrire, dans ce contexte général, l'historique des activités de démolition opérées sur les sites de Trélon et Liessies (usine *C-Factory*) (département du Nord), Westroozebeke (usine *D-Factory*) (Flandre occidentale, Belgique) et de la « Place à gaz » (en forêt de Spincourt, commune de Gremilly, département de la Meuse). Il s'agit en effet de sites historiques sur lesquels les activités anciennes d'éradication massive d'engins de guerre causèrent des pollutions sévères, spectaculaires, des sols, ayant fait l'objet d'investigations et d'études environnementales approfondies dans le cadre de la présente recherche (cf. Section 3e du présent manuscrit).

1.1. LA MISE EN PLACE DE SERVICES D'ETAT POUR LA LIQUIDATION DES STOCKS

En France, fut spécialement créé pour liquider les REG et autres surplus de guerre, un organisme dit « temporaire du temps de guerre », le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stock (dépendant du Ministère des Finances). Les Alliés britanniques (avec le *Disposal Board*) et belges (avec la Commission Centrale de Récupération (CCR)) en firent de même, tout comme l'Allemagne (avec le *Reichsverwertungministerium*) dans le cadre de sa démilitarisation contrainte.

1.1.1 Le *Disposal Board*

Le *British Disposal Board* (Service Britannique pour la liquidation des stocks) (DB) fut créé en 1920 dans le but de libérer les sols français et belges des munitions et matériels de guerre britanniques et pour se substituer en cela à l'Armée qui démobilisait. Créé par le Ministère britannique de l'armement, son fonctionnement souleva initialement de vives critiques relayées par la presse. Elles conduisirent le Ministère de l'armement à diligenter une enquête en France suite à laquelle fut placé à la tête du service le colonel H.C. Cole[1383].

Les demandes d'enlèvement des matières et matériels explosibles en secteurs britanniques étaient adressées par l'entremise des sections franco-britanniques, attachées aux états-major des deux régions militaires et au quartier général britannique à Lille, Le Touquet et Wimereux. Quatre usines de démolition d'engins de guerre furent installées, à Zeneghem (Bourbourg, département du Nord), à Rouxménil (département de la Seine-Maritime), Saigneville et Conteville-Domléger (département de la Somme)[1384]. Ces usines furent exploitées par des entreprises privées sous mandat du *Disposal Board*. Deux d'entre-elles ont été identifiées dans les archives consultées dans le cadre de la présente recherche : M. Cohen à Bourbourg[1385] et Armes Georges & Co et Bowen à Conteville Domléger[1386].

[1383] Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 1921. Bibliothèque nationale de France.

[1384] National Archives. Kew Gardens, London, number MUN 5 /188. Courrier du 23 septembre 1919.

[1385] National Archives. Kew Gardens, London, number MUN4 / 7010. Translation of Minute of Proceedings of the Commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to dump in the sea from the Port of Dunkerkeque gas shells and other ammunition.

[1386] National Archives. Kew Gardens, London, number MUN4 / 7010. Ministry of War. Department of Artillery. Translation. French Republic. Paris, the 28th October 1921. Signé : for the Minister & by his Order. The Director-General of Artillery.

Le DB n'avait aucun intérêt à manipuler les surplus britanniques sur les sols français pour les acheminer jusqu'aux ports de la mer du Nord et les rapatrier pour les détruire outre-manche au prix de coûts de transport exorbitants tout en s'exposant aux risques d'accidents. Comme nous allons le voir, un industriel britannique du nom de Francis Norman Pickett proposa au *Disposal Board* de démolir en France tous les surplus britanniques et de n'expédier vers la Grande-Bretagne que les produits issus de ces démolitions et valorisable dans le circuit économique britannique. Cette solution semblât profitable aux deux parties.

1.1.2 Le Service de Destruction des Munitions (SDM) belge

Le pendant du *Disposal Board* en Belgique, était le « Service de Destruction des Munitions » (SDM), un service de la « Commission Centrale de la Récupération » (CRR) qui fut spécialement créé en 1920 pour prendre à bras-le-corps la question de la récupération des munitions anciennes et de la liquidation des surplus de matériels ex-allemands. En Flandre occidentale, théâtre des opérations durant le conflit, le SDM fut assisté par le « Service des Régions Dévastées » (SRD), dédié aux travaux de remise en état des sols sur les anciennes lignes de front.

2. Enjeux et problématiques motivant la liquidation des surplus de guerre

Les raisons pour lesquelles les surplus de guerre de 1914-1918 furent liquidés étaient multifactorielles. On retrouve pour ces vastes dépôts constituant les surplus des problématiques et des enjeux assez similaires à ceux identifiés pour les dépôts de moindre importance et plus proches du front ou encore, comme nous venons de la voir dans le cas plus spécifique du Territoire d'Alsace-Lorraine. La différence résidait dans les tonnages à traiter localement.

Premièrement ces importantes quantités de matériels nécessitaient pour leur entreposage de larges emprises au sol. Les seules données chiffrées identifiées dans le cadre de cette recherche concernent les dépôts de base et intermédiaires positionnés sur la méridienne logistique reliant les ports de l'Atlantique à la Haute-Marne et ceux avancés des zones des armées de l'AEF. Au 19 novembre 1918, l'ensemble des dépôts de munitions du Corps expéditionnaire américain en France se répartissait sur 19 ha environ (cf. Tableau 27).

Localisation des dépôts	Surface (square feet)	Surface (ha)	Tonnage correspondant
Munitions dans le *Service Of Supply* (1)	1 331 593	12	147 955
Occupés	981 239	9	-
Disponibles	350 354	3	-
Munitions en transit dans le *Service Of Supply* (2)	40 770	0,4	4 530
Munitions dans les zones des armées (3)	664 110	6	73 790
Total (1+2+3)	**1 686 119**	**19**	**226 275**

Tableau 27 : Superficies occupées par les dépôts de munitions de l'AEF en date du 19 novembre 1918[1387].

[1387] National Archives, Washington D.C., number RG-120 (AEF). Ordnance Department Supply Division. Ammunition Section. Correspondence. 1917-1919. Box n°2

Les dépôts de munitions furent la plupart du temps installés sur des terrains qui avaient été réquisitionnés d'office en invoquant les nécessités et circonstances exceptionnelles de la guerre ou, au mieux, pour lesquels un accord fut passé avec les propriétaires fonciers pour une occupation temporaire en échange d'un loyer. Après-guerre, les propriétaires lésés par la réquisition réclamèrent des indemnisations pour les préjudices subis et pour la remise en état de leur terrain une fois les dépôts évacués.

Libérer les terrains des monceaux de munitions devenues inutiles, c'était non seulement restaurer pour ces propriétaires la libre jouissance de leur bien, mais aussi pour l'Armée et l'Etat, garants de la sécurité des populations, réduire les moyens (et donc les charges) à mobiliser pour garder ces dépôts.

Ensuite, comme pour les dépôts de rassemblement près du front, l'accumulation sur des aires géographiques restreintes de tonnages élevés de matériels et matières dangereux (incendiaires, explosifs, toxiques et agressifs) exposait le voisinage à d'indéniables risques en cas d'incidents, ces derniers, même minimes pouvant alors déboucher sur une catastrophe. Progressivement, le temps faisant, ces surplus initialement en bon état et potentiellement utilisables, se déprécièrent accroissant l'instabilité des munitions anciennes ce qui décuplait les risques d'incendie et d'explosion. Les surplus devinrent aussi avec le temps des déchets de guerre dont il fallait se débarrasser.

Parfois encore, les surplus devaient être détruits sur place car leurs quantités étaient telles qu'elles avaient été jugées intransportables dans de bonnes conditions de sécurité sur de longues distances. Ces transports étaient non seulement dangereux mais mobilisaient beaucoup de main d'œuvre, de moyens matériels, encombraient inutilement les voies de chemins de fer et/ou les canaux fluviatils et étaient *in fine* chronophages (phases de chargement, de transport et de déchargement). Le Corps expéditionnaire britannique en France et celui français en Italie du nord furent confrontés à cette situation et furent amenés à démolir, au plus près des dépôts, ces excédents devenus indésirables.

Enfin, ces surplus étaient regroupés dans de vastes dépôts qui constituaient de véritables « gisements » de matières (fer, acier, cuivre, zinc, nitrates, etc.) propriétés d'Etat, par milliers de tonnes, si coûteuses à produire durant la guerre, ou butins de guerre pris aux Allemands, qui, sous la forme de matières et matériels de guerre ne trouvèrent plus aucun intérêt ni débouché dans l'entre-deux-guerres mais dont les reconstructions avaient grand besoin une fois transformées. Ce passage des munitions aux matières premières nécessita la neutralisation et le déchargement des engins, opérations dangereuses.

3. Liquidation des surplus obsolètes

3.1. LES EXCEDENTS MILITAIRES

3.1.1 Démolition des surplus d'artillerie de tranchée : l'exemple de Grenoble et du site des Burettes (département de l'Isère)

Gardienne des frontières alpines avec l'Italie et plus anciennement les Etats des Savoies, et base arrière pour les opérations militaires diligentées dans les Alpes, Grenoble, située à la croisée de deux vallées stratégiques, reste une ville de garnison qui possède une longue tradition industrialo-militaire. La ville fut couronnée dès la fin du XIXe siècle d'une ceinture de six forts équipés de 130 pièces d'artillerie et le grenoblois concentre encore aussi de nombreux casernements (des unités du Génie, de l'Artillerie et de l'Infanterie (Chasseurs alpins)) associés à des terrains de manœuvre et des champs de tir, comme celui de Chambarran dans le proche Vercors.

En 1914, le déclenchement de la Première Guerre mondiale accéléra l'expansion économique de la ville en faisant de l'Isère, et du grenoblois en particulier, une plaque tournante de la chimie de guerre. Le gouvernement demanda à la région de fournir force et matériel électriques, des obus, des explosifs, des engrais, du coton nitré, du papier à cartouches ou encore des biscuits. Les plateformes électrochimiques du Pont-de-Claix et de Jarrie furent créées dès 1916 à la faveur du second emprunt national, pour produire du chlore et des gaz de combat chlorés (phosgène et de l'*Ypérite*). Les obus étaient produits notamment dans les usines électrométallurgiques de la vallée de la Romanche (comme à Livet-Gabet) (cf. Figure 196).

Des usines métallurgiques comme les établissements Bouchayer-Viallet transformèrent leurs ateliers en fabrique d'obus et de matériels de précision. Grenoble et sa région fournirent 50 000 obus par jour grâce au travail des femmes embauchées à l'occasion pour remplacer les hommes partis sur le front. Les projectiles étaient chargés avec des explosifs nitrés produits au Péage-de-Roussillon ou à Lyon. Les obus chimiques étaient chargés dans des ateliers qui étaient localisés dans la partie sud de la plateforme chimique de Pont-de-Claix et possiblement dans un atelier situé (vers Champagnier) entre Pont-de-Claix et Jarrie. Pendant la Première Guerre mondiale une grande quantité de torpilles à ailettes (projectiles d'artillerie de tranchée comme les « *Crapouillot* » 58 T) fut stockée sur le polygone de tir, le terrain d'entrainement de l'Artillerie à Grenoble, historiquement localisé le long et en rive droite de l'Isère à quelques kilomètres seulement au nord du centre-ville de la capitale iséroise.

Figure 196 : Tournage de projectiles à ailettes de 240 mm dans une usine de l'Isère (Livet-Gabet)(1915)[1388].

[1388] Photographie, bibliothèque municipale de Grenoble.

Le 18 juin 1918, à la suite d'une mauvaise manipulation lors du déchargement au polygone d'un wagon de fûts d'explosifs perchloratés destinés à des établissements pyrotechniques, une étincelle mit le feu à un des fûts. Des tonneaux firent alors accidentellement explosion sur le polygone, suivis par d'autres détonations jusqu'à une heure du matin, le feu s'étant propagé de proche en proche par l'herbe enflammée (cf. Figure 197). Les dégâts matériels furent considérables dans la ville, mais par chance on ne déplora qu'un seul mort.

Le Conseil municipal de Grenoble exprima alors son souhait auprès du Ministre de l'Armement « *tendant à l'éloignement de tout dépôt d'explosifs et de munitions à une distance minima de 12 km de toute agglomération*[1389] » appuyant sa demande par une pétition des Syndicats patronaux de Grenoble « *demandant la suppression de tout dépôt de matières explosibles pouvant être une cause de danger pour la ville*[1390] ».

L'autorité militaire décida alors de déménager les engins initialement entreposés sur le polygone sur les terrains communaux dits « des Burettes » sur le territoire des communes de Pénol, Sardieu, Marcilloles et Balbins, dans les « Terres Froides » entre Grenoble et Bourgoin-Jailleux (à 45 km au nord-ouest de Grenoble). Mais le déplacement de ces 36 000 torpilles et bombes de tous calibres[1391], pesant chacune de 250 à 500 kg, aux Burettes n'était pas uniquement une mesure d'éloignement des projectiles hautement explosifs de Grenoble. Le terrain des Burettes n'avait pas vocation de site de stockage mais bien de destruction des munitions. L'acheminent fut réalisé par train jusqu'au village de Marcilloles, l'existence d'une ligne de chemin de fer fut importante dans le choix du site.

Parallèlement, l'Armée procéda à des destructions par pétardement de munitions résiduelles au droit du polygone de tir. Les vastes entonnoirs d'éclatement (« explosoirs ») sont parfaitement visibles sur l'ortho photographie ancienne de 1926 (cf. Figure 198). Des projectiles sont encore régulièrement découverts et mis à l'affleurement à la faveur de travaux au droit de ce site actuellement occupé par les installations du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique)[1392].

En 1921, l'entreprise Bouxin, sous contrat avec le Ministère de la Guerre via le Parc d'Artillerie Régional de Grenoble, débuta la destruction de cet arsenal aux Burettes. *« Dans les terrains vagues de la commune de Pénol, au camp de Burette [sic] […] a été installé un camp de récupération où sont, amenés des obus-torpilles-bombes, qui n'ont pas été utilisés pendant la guerre et dont on cherche à extraire les matières encore utilisables. C'est un Alsacien. M. Bouxin, qui dirige ces minutieuses opérations et qui a d'autres chantiers semblables à Strasbourg, Metz, Bourges, etc.*[1393] *».* Les intentions des destructions sont ici explicitement avancées : neutralisation des engins pour la récupération des matières valorisable selon un processus contractuel mis en œuvre partout ailleurs en France pour liquider les surplus et les REG. Bouxin était déjà sous contrat avec le Ministère de la Guerre et celui des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) pour la liquidation des munitions explosives du territoire d'Alsace dans son chantier de la forêt d'Illkirch, au sud de Strasbourg (département du Bas-Rhin (cf. Section 9h du présent manuscrit).

[1389] Archives municipales de Grenoble. Courrier de Monsieur le Maire de la Ville de Grenoble à Monsieur le Préfet de l'Isère du 19 juillet 1918. Objet : guerre. Les explosions des 29 et 30 juin.

[1390] *Ibid.*

[1391] Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des débats politiques et littéraires* du 09 novembre 1928.

[1392] Communication orale personnelle.

[1393] Bibliothèque nationale de France. *Journal de Cherbourg* du 26 novembre 1923.

L'entreprise débuta la destruction des munitions par pétardement en fourneaux. Pour cela, les bombes étaient disposées par dix dans des trous profonds et reliées à un cordon détonant *Bickford* pour actionner l'explosion. Ces explosions provoquèrent des ondes de choc qui ébranlèrent les habitations du voisinage, l'église de Faramans fut endommagée, et des éclats tombèrent dans les communes voisines. La position de ce terrain d'explosion fut identifiée par une reconnaissance de terrain.

Suite à une plainte du conseil municipal de Sardieu, le 6 février 1921, l'autorité militaire fit cesser ces explosions et autorisa l'entreprise à neutraliser les projectiles par sciage (tronçonnage) pour récupérer l'acier. Pour éviter toute étincelle, le sciage s'effectua sous l'eau. La poudre de *Cheddite* renfermée dans ces engins, une fois retirée des parties sciées, était brûlée sur place. A noter qu'il s'agit de la seule mention de brûlage d'explosifs (per)chloratés identifiée dans le cadre de cette recherche. Si cette élimination par le feu semble singulière, c'est qu'il existe très peu d'informations sur les méthodes de destruction de projectiles français autres que le pétardement, comparativement à celles visant les engins ex-allemands ou britanniques. La méthode du sciage apparaît aussi extrêmement périlleuse, les sels de chlorate étant réputés sensibles au choc et à la friction, et étaient mélangés à de la paraffine, une association des comburants énergétiques (ClO_3^-) et du carburant (paraffine hydrocarbonée), (i) l'échauffement de la lame de la scie, (ii) la paraffine, (iii) les sels de chlorate rassemblaient dans le triangle du feu toute les conditions de l'ignition, puis de la détonation, que le sciage soit opéré sous l'eau ou non.

Inévitablement, un premier accident se produisit, le 23 novembre 1923, qui fit cinq morts. Le *Journal de Cherbourg* (édition du 26/11/1923) relata cet accident avec toute sa violence : *« Le personnel du camp de Burette s'occupait spécialement de vider des torpilles amenées du polygone d'artillerie de Grenoble. Six ouvriers étaient employés à couper en tranches de pains de Cheddite qui venaient d'être extraits de torpilles aériennes, quand une explosion se produisit. Cinq des ouvriers furent tués sur le coup et leurs membres déchiquetés, projetés à de longues distances ; on en retrouva à près de 300 mètres. Parmi les victimes étaient trois jeunes Français, habitant la commune voisine de Sardieu […]. Deux autres victimes sont des Marocains […]. Les débris de ces cinq hommes ont dû être recueillis dans des draps, un peu pêle-mêle, sans que les parents eux-mêmes aient pu les reconnaître. La sixième victime est un ouvrier marocain […]».* Un autre accident se produisit le 24 décembre 1923 causant la mort de quatre ouvriers.

A la suite de ces deux drames, l'entreprise cessa les travaux de sciage et demanda la résiliation du contrat le liant au Ministère de la Guerre. Ainsi de 1924 à 1928, 30 000 bombes ou torpilles restèrent étendues à même le sol, sur 35 hectares. Quelques fils de fer barbelés entourèrent le site et un seul gardien, de réputation débonnaire, veillait sur cet immense dépôt. Exposés aux contrastes de température, il est vraisemblable que ces engins aient été dégradés et déstabilisés. En octobre 1926, le Conseil d'Etat refusa d'accepter la demande de Bouxin et intima l'ordre de continuer le démontage. Mais cette fois l'entreprise déclina la poursuite de ses travaux selon ces modalités particulièrement dangereuses et proposa en contrepartie d'enfouir les bombes une par une à 2 m 50 de profondeur.

Le Ministre de la Guerre accepta la proposition en 1928. Le choix de l'emplacement de l'enfouissement se porta sur une surface de 7 hectares sur la commune de Marcilloles que le Ministère de la Guerre acquit en urgence. Dès que le terrain fut libéré des bombes, l'autorité militaire y construisit l'aérodrome de Chambaran-Marcilloles utilisé jusqu'en 1939, puis démonté en 1964. A ce jour il ne reste plus rien de cet aérodrome militaire des années 30. Un simple grillage flanqué d'une pancarte rappelle qu'il s'agit d'une enclave militaire et qu'il est interdit d'y pénétrer.

Figure 197 : Habitants de Grenoble observant depuis un pont sur l'Isère le panache de fumée généré par la détonation accidentelle d'explosifs sur le polygone de tir le 18 juin 1918[1394].

Figure 198 : Entonnoirs de pétardement du polygone de tir de Grenoble en 1926[1395].

[1394] http://grenoble-cularo.over-blog.com/2020/12/grenoble-pendant-la-1ere-guerre-mondiale-191914-1918.html

[1395] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1926-02-24__C3234-0421_1926_NP3_R1_0007.

3.1.2 Rassemblement et la démolition de projectiles à chargement chimique à l'ERGMu de La Ferté-Hauterive, Saint-Loup (département de l'Allier)

Les munitions chimiques en excès firent l'objet de nombreuses attentions à la cessation des hostilités par le GQG. Le phosgène se conservait très bien, tandis que l'*Ypérite* avait tendance à s'épaissir avec le temps (polymérisation); on détermina alors qu'elle ne conservait plus que 50 % de ses propriétés lors des tirs d'essais effectués annuellement après la Grande Guerre. Delépine réussit à mettre au point, par un procédé de distillation, une méthode permettant de la stabiliser et de traiter l'importante quantité non chargée en obus. A l'armistice, il restait encore dans les différents Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR), un total de 13 850 tonnes de munitions chimiques diverses, soit 3 970 000 projectiles de calibres de 75 à 155 mm (cf. Tableau 28), principalement dans les 6e, 7e, 20e et 21e Régions militaires ainsi réparties : 1 000 tonnes au PAR de Langres, 1000 tonnes au PAR de la Fère, 11 000 tonnes au PAR de Toul, 300 tonnes au PAR de Strasbourg et 350 tonnes au PAR d'Epinal. Cette distribution géographique résultait vraisemblablement du déploiement de ces armes par le GQG français en vue de l'offensive initialement prévue au 1er semestre 1919. Le chargement de ces obus se répartissait, alors pour 50 % en phosgène, 40 % en *Ypérite* et 10 % en chargements divers. Il ne s'agissait que de munitions issues des fabrications de guerre. Tous les lots jugés comme « périmés » ou sujets à des fuites furent progressivement écartés. Puis, tous les stocks disponibles sur le territoire national furent regroupés au sein de l'ERGMu de La Ferté-Hauterive (département de l'Allier) où des terrains furent spécialement réquisitionnés pour leur entreposage. Une grande inquiétude s'installât, relative à la conservation des propriétés agressives de ces obus. Les surplus de guerre directement utilisable déclinèrent avec le temps alors que le nombre de projectiles obsolètes et hors service augmenta. Des tirs de contrôle annuels étaient réalisés ainsi que des inspections soignées des projectiles afin d'apprécier leur degré d'obsolescence. En 1930, 74 407 obus de 75 mm et 27 304 obus de 155 mm furent abandonnés par coulage en mer. Le stock de projectiles fut amputé d'un million d'unités entre 1920 et 1930.

Dans les années suivantes, il fut décidé de ne conserver que les chargements en *Ypérite* et en phosgène, mais l'*Ypérite* perdait irrémédiablement une partie de ses propriétés.

Calibres (mm)	1920	1930	Différentiel
75	2 900 000	2 192 000	708 000
105	30 000	19 500	10 500
120	135 000	106 000	29 000
145	85 000	76 000	9 000
155	791 000	580 000	210 000
Total	**3 970 000**	**2 973 500**	**996 500**

Tableau 28 : Evolution des surplus des munitions chimiques de la Grande Guerre entre 1920-1930 (en nombre d'unités)[1396].

Parallèlement à ces abandons définitifs par coulage maritime, des démolitions de munitions chimiques anciennes furent également opérées par un entrepreneur privé à l'ERGMu de la Ferté-Hauterive.

[1396] Tiré de Lejaille, A. (1999) Thèse de doctorat en pharmacie. *La contribution des pharmaciens dans la protection individuelle contre les gaz de combat durant la Première Guerre mondiale - Extension à la période 1920-1940* (Université Henry Poincaré, Nancy I). Ce travail fut récompensé par l'Académie Nationale de Pharmacie en 1999 et reçut le prix d'Histoire.

L'établissement fut en proie à des sinistres dès mai 1922 où un incendie d'un hangar détruisit 286 000 obus chimiques de gros calibre consécutivement à l'inflammation de poudre lors d'opérations de dessertissage de cartouches d'obus chimiques[1397].

L'entrepreneur Bouxin (Maurice Jules[1398]) se vit confié par le Commandement de l'Etablissement de Réserve Générale de Munitions de La Ferté-Hauterive, le 03 septembre 1923, sans mise en concurrence, un marché pour la démolition par brûlage de munitions chimiques à rebuter[1399]: étaient visés 160 000 obus en acier de calibre 75 mm, 30 000 obus de 120 mm F.A. (fonte aciérée), 11 000 obus de 145 mm F.A. et 142 000 projectiles de 155 mm F.A[1400], soit 343 000 engins (et 8,5% du stock entreposé en 1920). Des coupures de presse datant de 1923 indiquent aussi que des obus chimiques étaient pétardés de nuit et que des ouvriers procédèrent au désamorçage. Des accidents se produisirent à la faveur de ces opérations, les espaces de tête des obus chimiques anciens s'étant souvent mis sous pression en se dégradant avec le temps « *Au dépôt de munitions de La Ferté-Hauterive, un ouvrier algérien, âgé de 30 ans, dévissait un obus, quand la pression du gaz fit partir la fusée qui l'atteignit au visage. L'ouvrier a été tué net* [1401]».

La démolition de projectiles chimiques anciens semble s'être poursuivi à l'ERGMu de La Ferté-Hauterive au-delà de 1923, dix ans plus tard, si on se réfère à l'article du quotidien *L'Humanité* daté du 06 mai 1932 intitulé « *Alerte aux gaz ! l'Ypérite*[1402] ». « *C'était en automne 1927, à la 3e Compagnie du 130e BOA (Bataillon d'Ouvrier de l'Artillerie) au camp de la Ferté-Hauterive (Allier). […] Il y avait comme effectif environ 80 appelés venus ici par mesures disciplinaire et près de 200 Algériens, Kabyles, ne parlant pas un mot de français et travaillant sous la trique et subissaient les pires mesures de rigueur […]. Ils n'avaient pas de permission. Le travail […] consistait à dérouiller de vieux obus venant du front. Pour aller plus vite, on rationalisait ! Une chaine fut installée […]. Celui qui n'atteignait pas la cadence de 300 obus par jour était privé de permission ! S'il les dépassait il recevait quelques centimes supplémentaires […] mais la cadence était trop forte, on ne pouvait y arriver. […] Les obus contenaient des gaz asphyxiants. Souvent un sifflement semblable à un sifflement de locomotive se faisait entendre : c'était un obus « fuyard ». On sonnait l'alarme, sautait sur les masques que nous ne quittions pas et on allait enterrer l'obus. Ceux qui étaient trop rouillés étaient mis en tas dans un coin du parc et un artificier les faisait exploser la nuit. Comme tous les obus étaient asphyxiants, il arriva qu'un jour, par vent contraire, la sentinelle du fond du parc fut trouvée le matin inanimée* ». *[…] Je me souviens qu'un jour dans les tranchées profondes de 2 m 50 au moins, séparant chaque bâtiment, un des camarades, un Lyonnais, descendit faire ses besoins […] Le malheureux fut trouvé râlant. […] Dans un laboratoire 8 chimistes analysaient l'ypérite. Les obus ayant été vidés, on les rechargeait avec ce puissant corrosif. Certainement dans un but de Paix … ».*

[1397] Archives Départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 2 R 12. Gendarmerie Nationale. Rapport du Capitaine Joly, Commandant l'Arrondissement de Moulins sur un incendie à l'entrepôt de munitions de la Ferté Hauterive. Moulins, le 26 mai 1922.

[1398] Dont le siège social est rue Sutzenberger, Strasbourg-Robertsau. Il est probable qu'il y eut des liens familiaux entre Pascal Bouxin, désobusant dans l'Isère et à Illkirch et Maurice, Jules Bouxin sous contrat de destruction à la Ferté-Hauterive, à moins qu'il s'agisse d'une erreur sur le prénom dans les documents consultés et qu'il s'agisse de la même personne et/ou entité sous la raison sociale « Pascal Bouxin ».

[1399] Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. La Ferté Hauterive (Allier). Etablissement Bouxin.

[1400] Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. Ministère de la Guerre, Marché de gré à gré pour la démolition d'obus spéciaux stockés à l'Entrepôt de Réserve Générale de la Ferté Hauterive. Passé en exécution du §5 de l'Article 18 du décret du 18 novembre 1882. Le présent marché a été approuvé par décision ministérielle n° 77950 – 2 / 3 du 24 octobre 1922. La Ferté-Hauterive, le 25 novembre 1922.

[1401] Bibliothèque nationale de France. *Le Populaire* du 26 juillet 1923.

[1402] Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité* du 06 mai 1932.

Les opérations de déchargement des munitions chimiques obsolètes décrites dans la tribune de *L'Humanité* ne visait possiblement pas la récupération des vieux métaux formant les projectiles, destinés à la refonte sidérurgique mais bien la récupération du *casing* « à dérouiller » pour une remise en état en tant que munition (*retro-fitting*).

Les obus fuyards auraient été enfouis un par un au droit du site ou non loin. Les engins irrécupérables étaient pétardés en fourneaux par des artificiers et l'*Ypérite,* des engins qui purent être ouverts, infiltrées dans de profondes tranchées selon un protocole proche de celui (de l'infiltration en puits perdu) mis en œuvre par d'autres industriels lors du vidage d'engins chimiques à chargement liquide. Ces opérations visant des engins obsolètes s'avérèrent particulièrement dangereuses et réalisées dans des conditions de travail particulièrement éprouvantes, dénoncées par le quotidien de gauche *L'Humanité.*

3.1.3 Démolition de projectiles et de propulseurs d'artillerie de marine à l'ERGMu de Mézidon-Canon (département du Calvados)

Aucun document d'archive ne fut identifié dans le cadre de cette recherche concernant des opérations d'élimination d'engins de guerre au sein de l'ERGMu de Mézidon-Canon, au sud de Caen, dans le département du Calvados. Ce dépôt entreposait des projectiles destinés à la Marine. Des clichés, non datés, montrent toutefois que des projectiles furent bel et bien détruits selon des modalités industrielles, méthodiques, dans ce dépôt en procédant par vidage des étuis chargés en propulseurs, puis par brûlage en tranchées des poudres. Un personnel féminin mais aussi Annamite était employé à cette tâche au regard des clichés (cf. Figure 199). Il est vraisemblable que les métaux issus de ces neutralisations aient été récupérés pour être valorisés.

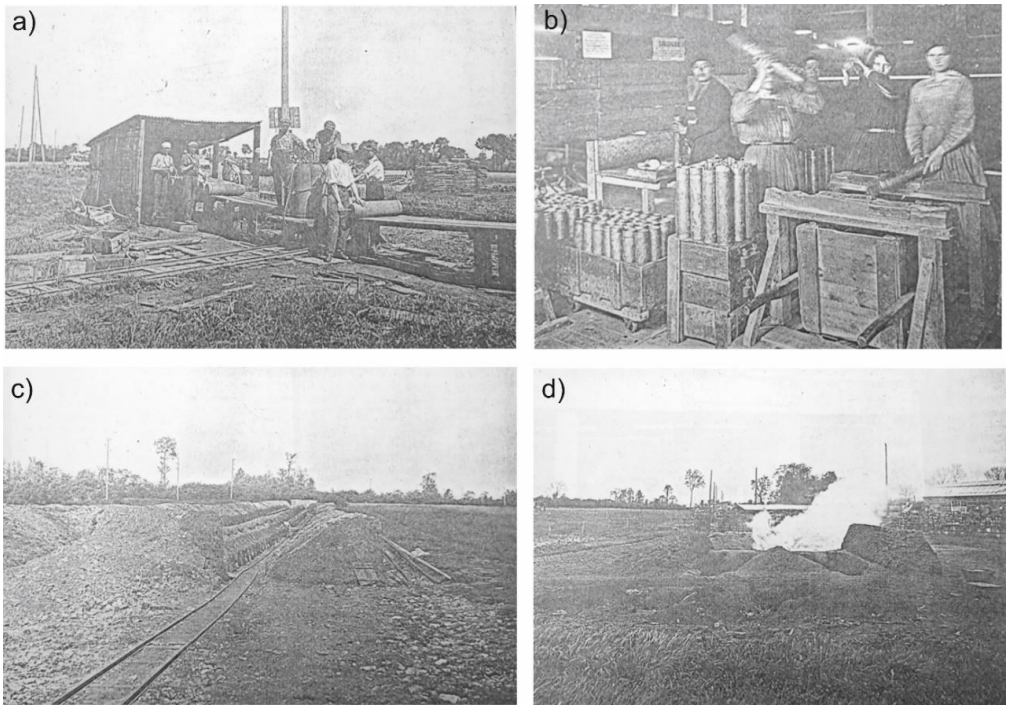


Figure 199 : Opération déchargement de munitions et de destruction de poudres propulsives à l'ERGMu de Mézidon-Canon (département du Calvados)[1403]. Aperçus photographiques (non daté). a) Préparation, b) Déchargement des cartouches à obus explosifs de 76 m/m chargés en Schneidérite (par grattage et brûlage). c) Tranchée de brûlage desservie par une voie étroite Decauville, d) Brûlage de poudre propulsives.

[1403] https://forum.pages1914-1918.com/viewtopic.php?t=9980

Explosion d'obus. — A Mézidon, à quelques kilomètres de Caen, se trouve le dépôt d'artillerie de Percy. Avant-hier, on y avait préparé un brûlage d'obus et placé, dans une excavation, quatre-vingts projectiles de 220. La déflagration fut formidable et entendue à une distance de cinquante kilomètres. Des milliers de vitres furent brisées et toute une région se trouva privée de courant par suite de la destruction d'une canalisation électrique. L'explosion provoqua dans plusieurs villages une panique. A Saint-Pierre-sur-Dives, notamment, les fidèles, réunis à l'église, s'enfuirent, croyant que la foudre était tombée sur l'édifice. A Falaise, les maisons tremblèrent et les habitants pensèrent à une secousse sismique. Il n'y a pas eu d'accident de personne.

Selon l'article du *Temps* ci-contre, des démolitions de munitions de 220 mm par brûlage auraient aussi été opérées sur ce site au moins jusqu'en 1923. Il n'est fait aucune mention de l'entité qui procéda à ces opérations. En Normandie comme ailleurs, ces opérations se soldèrent par des accidents, qui, de par leur caractère spectaculaire et/ou dramatique, rendirent ces liquidations de munitions visibles dans les documents d'archives.

Figure 200 : Extrait Le Temps, 28 mai 1923[1404].

3.1.4 Enfouissement d'obus au gouffre de Jardel (département du Doubs)

Le gouffre de Jardel (département du Doubs), avec une profondeur de 130 mètres environ, fut le réceptacle d'obus défectueux, obsolètes, dont l'armée n'avait plus usage au terme de la Première Guerre mondiale. Après avoir été acheminés par train jusqu'à la gare de Pontarlier, puis par camions et par wagonnets sur une voie étroite Decauville, ces obus y furent précipités en 1923 par l'Armée française. En l'absence d'archives, la masse totale a été estimée à 3 000 tonnes par la Sécurité Civile (Service du Déminage).

3.2. LES EXCEDENTS INDUSTRIELS

Il s'agit d'excédents de production industrielle restés entreposés dans les stockages des usines de fabrication des munitions, des poudres, explosifs, toxiques de guerre et autres ateliers de chargement, avant qu'ils n'aient été livrés aux armées. Ces matériels furent abandonnés par immersion terrestre, enfouissement ou furent encore l'objet de tentatives de récupérations des matières constitutives. Les exemples exposés dans ce qui suit illustrent la diversité des solutions retenues pour se débarrasser de ces surplus.

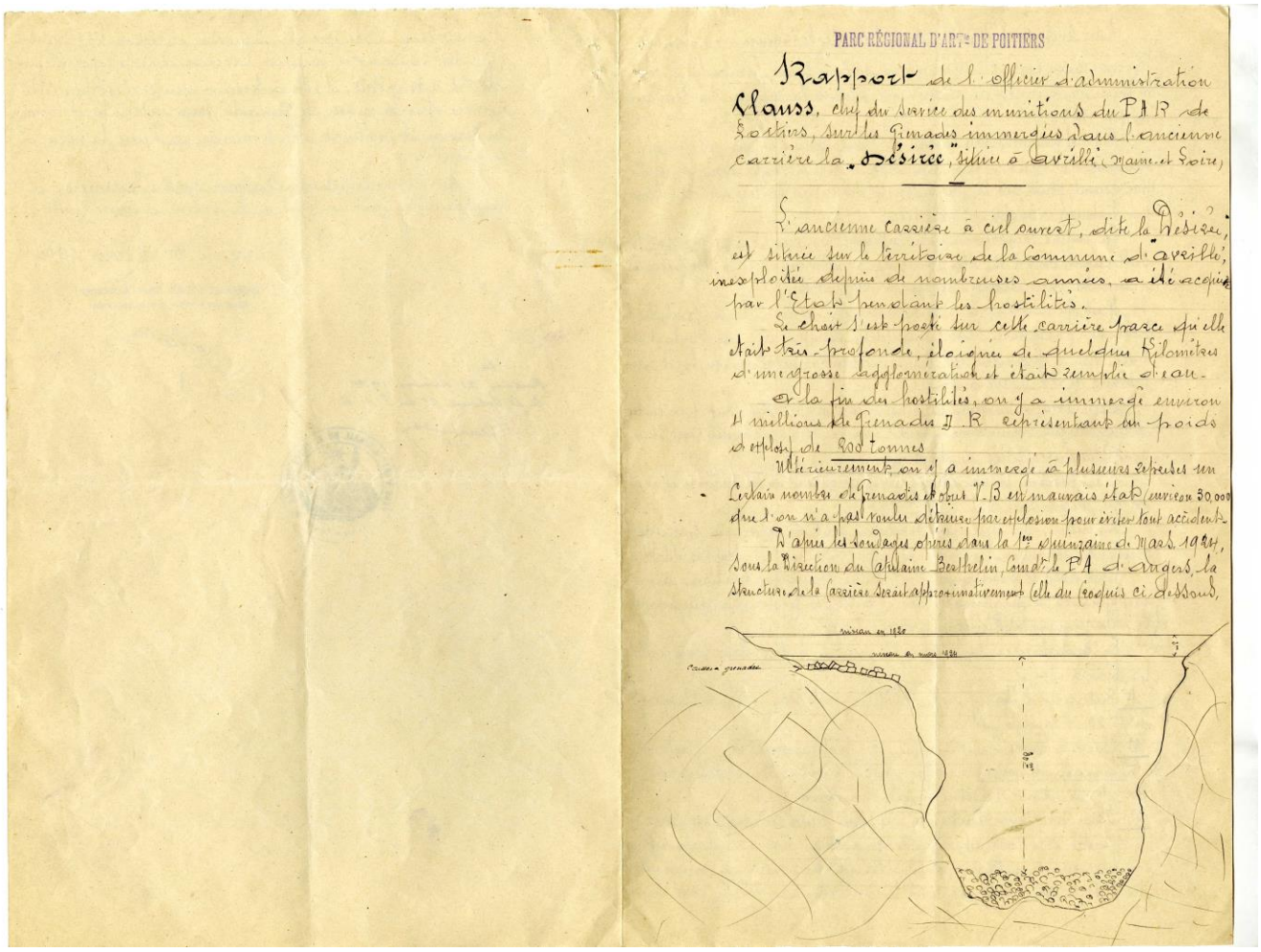
3.2.1 Abandon de grenades chloratées dans le « Lac bleu » à Avrillé (département du Maine-et-Loire) par ennoyage terrestre

Le Lac Bleu d'Avrillé (département du Maine-et-Loire) en banlieue d'Angers est une ancienne carrière d'ardoise à ciel ouvert, dont l'exploitation fut abandonnée vers 1840. Suite à son abandon, elle s'ennoya naturellement et se transforma en plan d'eau (cf. Figure 201 page suivante). A partir de 1919, des engins pyrotechniques à rebuter furent coulés dans le lac (dénommé « Lac bleu d'Avrillé »). Il s'agissait de grenades défectueuses et d'explosifs de la Première Guerre mondiale, ainsi que de munitions issues de la proche usine d'armement de Montreuil-Juigné. « *A la fin des hostilités on y a immergé environ 4 millions de grenades […] représentant un poids d'explosif de 200 tonnes* [1405]».D'autres projectiles furent coulés dans un second temps, afin de les éliminer en toute sécurité *« Ultérieurement on y a immergé à plusieurs reprises un certain nombre de grenades et obus V.B. en mauvais état (environ 30 000) que l'on n'a pas voulu détruire par explosion pour éviter tout accident* ». Les grenades noyées à Avrillé étaient chargée d'explosifs chloratés.

[1404] Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 28 mai 1923

[1405] Parc d'Artillerie de Poitiers. Rapport de l'officier d'administration Klauss, Chef du Service des Munitions du PAR de Poitiers sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière La Désirée située à Avrillé, Maine et Loire. Poitiers le 20 mars 1924. Signé : Klauss. Communication personnelle (les cotes n'ont pas été transmises).

La « légende » voudrait que les eaux du lac se soient colorées de bleu lors de l'ennoyage des grenades chargées de *Cheddite* teintée au Bleu de Méthylène. Des munitions en surplus datant de la Grande Guerre furent aussi précipitées dès 1918 et l'armistice, dans le lac de Gérardmer (département et massif des Vosges), profond de 36 mètres. Dans les années 80 et 90, et ce pendant quinze ans, les démineurs de la Sécurité Civile de Colmar purgèrent en partie le lac jusqu'à 25 mètres de profondeur et purent extraire jusqu'à 15 tonnes de munitions par an.


PARC RÉGIONAL D'ART^E DE POITIERS

Rapport de l'officier d'administration Klauss, chef du service des munitions du PAR de Poitiers, sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière la "Désirée", située à Avrillé (Maine-et-Loire)

L'ancienne carrière à ciel ouvert, dite la Désirée, est située sur le territoire de la Commune d'Avrillé, inexploitée depuis de nombreuses années, a été acquise par l'Etat pendant les hostilités.

Le choix s'est porté sur cette carrière parce qu'elle était très profonde, éloignée de quelques kilomètres d'une grosse agglomération et était remplie d'eau.

A la fin des hostilités, on y a immergé environ 4 millions de grenades V.B représentant un poids d'explosif de 800 tonnes.

Ultérieurement, on y a immergé à plusieurs reprises un certain nombre de grenades d'objet V.B en mauvais état (environ 30.000) que l'on n'a pas voulu détruire par explosion pour éviter tout accident.

D'après les sondages opérés dans la 1re quinzaine de Mars 1924, sous la direction du Capitaine Barthelin, Cond^t le PA d'Angers, la structure de la carrière serait approximativement celle du croquis ci-dessous.

Figure 201 : Rapport de l'Officier d'administration Klauss, Chef du Service des Munitions du PAR de Poitiers sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière La Désirée située à Avrillé. Le 20 mars 1924. Schéma du massif de munitions[1406].

3.2.2 Coulages maritimes

Des archives portant sur la crise des munitions indiquent que l'Armée se demandait s'il n'était pas possible de repêcher les poudres nitrocellulosiques immergées au large de la rade de Toulon. L'immersion de ces ergols insolubles n'était pas destinée à leur abandon définitif mais plus généralement à leur stockage sous l'eau, afin de se soustraire aux risques d'auto inflammation à l'origine d'accidents catastrophiques (cf. Section 1h du présent manuscrit).

[1406] Parc d'Artillerie de Poitiers. Rapport de l'officier d'administration Klauss, Chef du Service des Munitions du PAR de Poitiers sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière La Désirée située à Avrillé, Maine-et-Loire, *op. cit.*

Par contre, la solution d'abandonner les munitions indésirables en mer fut régulièrement invoquée ou mise en œuvre au regard des archives consultées. Ainsi, lorsque les Britanniques évacuèrent leur dépôt de Rouxmenil en juillet 1920, ils ennoyèrent les propulseurs (*Cordite*) à 25 *miles* au large de Dieppe. Des obus chimiques furent aussi immergés à 25 *miles* au sud de Portland.

Un document, conservé aux archives nationales à Londres, intitulé « *Attached to the record of the proceedngs of the commission assembled at Dunkerque, 1st June 1921, Mémmorandum by the Chef d'Escadron de St. Sauveur of the staff of the « Inspection Générale des Munitions » regarding the decisions arrived at on June 1st 1921, during the conference at Dunkerque on the question of the dumping in the sea of ammunition by Messrs. Pickett*. » précise que les Français disposèrent de sites similaires à Marseille (Bouches-du-Rhône) et à Fouras (à l'embouchure de la Charente)[1407]. Selon ces mêmes sources, le gouvernement belge aurait aussi coulé des obus non loin du Havre depuis ce port.

Il s'agit d'une solution de liquidation des REG qu'il convient de mentionner dans le cadre de cette section historique, qui n'intéresse pas notre propos environnemental, centré sur les impacts des opérations de liquidations des REG sur le milieu terrestre (sols, eaux souterraines et superficielles et leurs sédiments).

3.2.3 Une neutralisation tardive des vieux obus chimiques de la Grande Guerre. Déchargement des engins 14 -18 post Seconde Guerre mondiale

Pour des raisons de sureté, le site en question a été volontairement laissé anonyme. A la fin de la Première Guerre mondiale, certains sites industriels renfermaient encore de grandes quantités d'engins, notamment chimiques, des grenades, des projectiles d'artillerie de campagne et lourde chargés d'*Ypérite.* Ces munitions chimiques n'avaient plus raison d'être au regard des besoins des armées et des exigences du droit international sur l'usage de ces armes. Elles furent alors laissées entreposées en dormance dans des dépôts constitués au sein même des usines, en attente qu'une solution technique soit trouvée pour les éliminer au mieux, c'est-à-dire les décharger profitablement en toute sécurité et espérer récupérer le métal des *casings*. Le temps passant, le vidage de ces engins devint de plus en plus complexe et de plus en plus risqué (notamment du fait de la polymérisation de l'*Ypérite* qui figeait et la mise sous pression de l'espace de tête de ces projectiles) et donc de moins en moins rentable.

Il fallut attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale pour que des solutions techniques de neutralisation de ce type d'engins, fiables, sûres et rentables, soit trouvées et prouvées sur le plan opérationnel et acceptées par les administrations.

Seuls les obus de calibre de 150 et 155 mm furent démolis par des entreprises privées mandatées par voie d'adjudication pour récupérer le métal. Les engins de 75 mm et autres grenades ne présentèrent plus aucun intérêt commercial compte tenu du coût trop élevé de déconstruction, des risques associés par rapport au bénéfice que ces industriels pouvaient tirer de la vente du métal de récupération. Ces déchets de guerre anciens furent essentiellement abandonnés par immersion et enfouissement.

La solution retenue pour décharger les vieux obus fut de les calciner vers 1950, plus de 30 ans après la fin de la Première Guerre mondiale, dans une installation dédiée, après de nombreux va-et-vients entre l'autorité militaire et l'autorité civile, inquiètes toutes deux au sujet des conditions de protection de l'environnement.

[1407] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 7010.

L'industriel était tenu de respecter des obligations réglementaires en matière (i) d'autorisation d'exploitation d'installations industrielles en application de l'Article 29 de la loi du 19 décembre 1917 sur les établissements dangereux, insalubres ou incommodes et de protection des travailleurs selon les termes du premier texte réglementant le travail sur ces installations pyrotechniques dangereuses (circulaires des 22 août 1947, 1er mars 1948 et 1er juillet 1948 encadrant le fonctionnement des chantiers de destruction de munitions). Les accidents, brûlures à répétition, semblèrent faire entorse aux dispositions prévues par ces textes. Le 13 janvier 1950, un rapport, établi suite à une visite du site par l'Inspection du travail, relata les nombreux accidents du travail affectant les personnels. Par son courrier du 20 janvier 1950 au directeur de la société, le Préfet demanda au Ministre de l'Industrie et du Commerce de fermer l'atelier sur son emplacement où il fonctionnait depuis six mois. Le chantier fut finalement réglementé par le Préfet en octobre 1950 et janvier 1951. Mais en 1951, l'activité fut suspendue par le Sous-Secretaire d'Etat à l'Industrie et au Commerce reprochant au Préfet d'avoir fait preuve de négligence dans l'octroi des autorisations d'exploiter.

Une seconde société fut mandatée en remplacement de celle suspendue et exerça ses activités à partir de 1954, malgré l'avis défavorable des autorités. Après plusieurs enquêtes, l'activité fut autorisée le 12 janvier 1955 jusqu'au 10 mars 1955. Enfin, une dernière autorisation fut accordée le 20 octobre 1955 du fait de l'existence d'un résiduel de munitions en attente de démantèlement.

Ces installations de neutralisation comprenaient (i) six ateliers de démontage, dans lesquels les obus à *Ypérite* étaient débarrassés de leurs équipements comme les gaines-relais vissées à l'œil des obus et/ou les ceintures de guidage en métal mou, (ii) un four de grillage des obus formé par une sole de brûlage des engins toxiques, une cheminée pour le tirage et deux tours d'épuration. L'exploitant procédait de la manière suivante.

L'obus à griller était manipulé à l'aide de pinces, évitant le contact avec les mains, pour être placé dans un coffre métallique clos. Sa gaine-relai, formant le bouchon (explosif) du réservoir à *Ypérite*, était dévissée dans un étau au moyen d'une clé carrée entrant par pression dans la gaine et tournée avec un bras de levier ; les ouvriers travaillaient avec des vêtements huilés, des gants et des lunettes ; un tuyau d'aspiration débouchait sur l'étau pour aspirer les éventuelles vapeurs libérées au moment du dévissage de la gaine ; d'abord rudimentaire et relié à un ventilateur trop peu puissant, le dispositif fut amélioré avec des tuyaux en plomb et des moteurs de ventilateur plus puissants. L'engin était ensuite sorti de l'étau, toujours à l'aide de grandes pinces, et laissé à l'air libre tout près des ouvriers, la gaine retirée.

L'Inspection du travail précisa dans ses rapports « […] *et s'ils sont la plupart du temps dans la position verticale, certains tombent et restent couchés* » ; l'obus débouché était placé debout derrière les ouvriers qui ne pouvaient voir leur éventuel basculement ; par ailleurs l'Inspection du travail fit remarquer « *qu'il s'échappe une vapeur d'ypérite très apparente. Les ouvriers restent 8 heures consécutives dans une atmosphère qui bien qu'à l'air libre n'en contient pas moins une certaine quantité d'ypérite gazeuse* ». L'engin était ensuite chargé, toujours avec les mêmes précautions, sur un wagonnet et acheminé vers le four avec ses brûleurs à mazout. Un premier wagonnet avec son chargement était introduit dans le four, alors que pendant le brûlage, un second wagonnet était placé dans une chambre d'attente (sas) à l'entrée du four. La charge fut laissée une heure et demie environ et lorsque l'obus été retiré, il était débarassé de l'*Ypérite*.

D'après les archives, le site aurait procédé à la destruction de 4 500 tonnes d'obus à *Ypérite.* Considérant qu'il s'agit en grande majorité d'obus chimiques français de 150 et 155 mm d'un poids unitaire de 45 à 50 kg environ, les quantités d'obus éliminés par ce site serait de l'ordre 90 000 à 100 000 unités.

3.2.4 L'élimination d'excédents industriels de perchlorate d'ammonium par coulage terrestre. Chedde / Passy (département de la Haute-Savoie)

Un important surplus de production de perchlorate d'ammonium NH_4ClO_4 (servant à la fabrication des explosifs des projectiles d'artillerie de tranchées et grenades de l'infanterie) fut éliminé par l'Armée par noyage dans le torrent Arve à Chedde / Passy (département de la Haute-Savoie) à proximité de la poudrerie militaire attenante à l'usine de production des sels de chlorate et de perchlorate (exploitée par la SARV, Société des Forces Motrices de l'Arve, absorbée en 1916 au sein de la Compagnie des Produits chimiques et électrométallurgiques d'Alais et de la Camargue (PCAC)).

Les agents du Service des Poudres, noyèrent 4 347 tonnes de perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4) en fûts (opération ayant donné lieu à des plaintes jusqu'en Suisse, à 50 km du site). L'ordre du noyage émana du Ministère de la Reconstitution Industrielle. Le Ministre s'adressa ainsi au Directeur de la Poudrerie de Vonges (département de Côtes-d 'Or), dont dépendait celle de Chedde, par un courrier daté du 13 août 1919, en ces termes « *Je vous confirme les instruction téléphoniques qui vous ont été données ce jour : 1/ Commencer sans délais à Chedde le noyage dans l'Arve du perchlorate d'ammoniaque stocké en barils dans les magasins longeant la voie ferrée ; 2/ Envoyer sur place un Ingénieur pour organiser ce noyage sur l'échelle la plus étendue possible avec minimum de 100 tonnes par jour ; ce tonnage devra atteindre aussi rapidement que possible le chiffre de 200 à 300 tonnes*[1408] ». Le rythme soutenu exigé pour ces noyages et ces destructions des sels perchloratés démontre là aussi une situation d'urgence.

Suite aux plaintes déposées auprès des Eaux & Forêts du fait d'une surmortalité de la faune aquatique, les opérations furent suspendues puis reprises mais en suivant un protocole de dilution préalable afin de limiter l'impact des opérations sur les poissons. Ainsi dans le cas de Chedde, il n'y eut ni volonté ni tentative d'extraire du perchlorate l'ammonium susceptible d'être utilisé comme engrais.

Cet exemple met en lumière que des usines de guerre furent donc aussi potentiellement pourvoyeuses de composés d'origine pyrotechnique marquant la qualité actuelle des sols et/ou des eaux souterraines.

3.3. DEMOLITION DES MUNITIONS EXCEDENTAIRES PAR LE CORPS EXPEDITIONNAIRE FRANÇAIS EN LOMBARDIE (ITALIE)

Suite à l'effondrement du front italien à Caporetto le 24 octobre 1917, les troupes austro-hongroises, appuyées par des unités allemandes progressèrent de 28 km durant cette première journée et mirent en déroute les IIe et IIIe Armées royales du général Cadorna. Devant la gravité de la situation, et pour respecter les accords alliés d'aide réciproque, le général Pétain, expédia dès le 27 octobre 1917, via la vallée de la Maurienne, des renforts vers le front italien. Le 20 novembre, un autre Corps d'Armée, débarqua en renfort. La Grande-Bretagne envoya aussi cinq divisions. Après de violents combats autour du Monte Tomba, l'offensive libératrice n'arriva qu'en octobre 1918 lorsque le généralissime Diaz lança, le 24 octobre, ses sept armées contre les positions ennemies, sur un front d'Asiago à l'Adriatique. 300 000 prisonniers, 5 000 canons furent capturés quand sonna l'heure de l'armistice signé le 3 novembre à Padoue. Les Forces françaises rentrèrent en France sur une période s'échelonnant de mars à juillet 1919.

[1408] Service Historique de la Défense, site de Châtellerault. Communication personnelle (les cotes n'ont pas été transmises).

Lors de leur repli du front vers leurs bases arrières italiennes, avant d'entamer leur rapatriement, les troupes françaises récupérèrent les munitions et artifices (signaux et fusées éclairantes) des dépôts avancés épars pour les regrouper dans les dépôts de base (notamment celui de Corsico, à proximité de Milan et de Lambrate). Mais « *La séparation réglementaire des munitions de nature différentes ne se trouve plus réalisée dans les dépôts de la Base, par suite du nombre considérable de munitions reçues de l'avant*[1409] ».

Cet afflux de matériels ne permettait plus d'assurer le respect des règles de base élémentaires et réglementaires en matière de sécurité des stockages de munitions.

Des engins devant être entreposés séparément se retrouvèrent mêlés : des engins au fulminate avec des munitions d'infanterie de 65 et 75 mm, les artifices avec des bombes de tranchées, etc. « *Cette situation présente un danger sérieux pour les localités voisines des dépôts. Les conséquences d'une explosion toujours possible, seraient plus importantes, par suite du stockage dans les dépôts de la Base d'une grande quantité d'obus toxiques*[1410] ». Pour solutionner cette situation périlleuse, l'option de la destruction en Italie de tous les obus explosifs détériorés fut retenue écartant par-là les options (i) du rapatriement d'une partie de l'arsenal d'artillerie lourde et d'artillerie de campagne (ii) de la création de nouveaux dépôts. Ces décisions furent prises les 5 et 21 janvier 1919.

Cette démolition ne visa pas uniquement les engins découverts et récupérés à l'avant sur les anciens champs de bataille mais aussi ceux en surplus stockés dans les dépôts de la base. Cette position fut arrêtée alors que des opérations de destruction (par brûlage à l'air libre ?) de poudres douteuses étaient déjà en cours mais conduites d'une manière très lente en raison du manque de personnel ayant les aptitudes requises pour leur examen. Resta alors à trouver un terrain qui pouvait se prêter en toute sécurité à la destruction de grandes quantités de matériel explosible. Le terrain retenu, à l'écart des zones densément peuplées de la région de Milan, et d'installations industrielles sensibles, était situé à 2 km environ au nord-ouest de Somma Lombardo, près de Varèse. Il s'agissait d'un champ de tir de l'Artillerie alors inutilisé. L'acheminement au terrain d'explosion devait s'effectuer durant six mois à hauteur de 20 tonnes de projectiles par jour (soit environ 3 000 à 4 000 tonnes au total).

Par contre, certains engins non transportables (comme les 1 968 grenades OF amorcées avec bouchons allumeurs automatiques) devaient être démolis à proximité du dépôt de Corsico. Afin de sécuriser au plus vite les dépôts, un ordre de priorité fut défini, en débutant les opérations par les matières et matériels les plus instables et les plus dangereux : grenades et bombes, artifices, poudres. Les quantités étaient considérables : plus de 1 130 000 engins dont environ 550 000 grenades, 220 000 cartouches pour pistolets signaleurs, 125 000 bombes de tranchées (cf. Figure 202). Il convient de signaler ici que ces engins et artifices étaient en grande majorité chargés d'explosifs chloratés ou perchloratés de conservation douteuse.

[1409] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Base française d'Italie, Parc Annexe d'Artillerie. Le Chef d'Escadron Scherer Commandant le P.A. de la Base à Monsieur le Commandant de la Base Française d'Italie. Milan, le 29 janvier 1919. Signé : Scherer.

[1410] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Base française d'Italie, Parc Annexe d'Artillerie*, op. cit*.

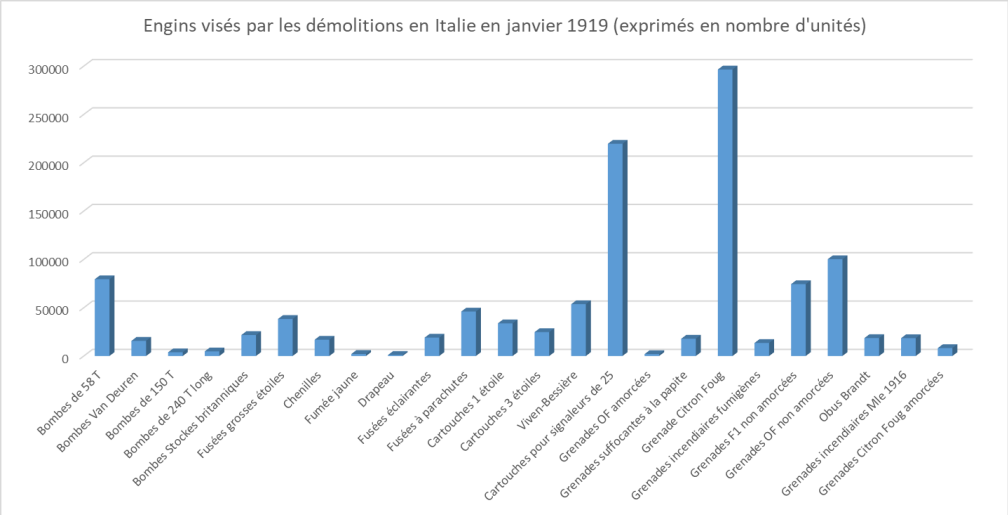


Figure 202 : Nombre et nature des projectiles, signaux et artifices visés par les démolitions par la Base Française d'Italie en janvier 1919[1411].

C'est ainsi que le Corps expéditionnaire français en Italie, tout comme l'AEF et le BEF sur le sol français, eurent à démolir une partie de leurs munitions « loin de leurs bases » du fait des contraintes logistiques et sécuritaires du transport de matériels et matériaux lourds et se dépréciant rapidement avec le temps. Aucune archive n'a été identifiée dans les fonds consultés concernant d'autres opérations de démolition de munitions menées par les troupes françaises sur d'autres fronts éloignés (comme celui tenu par le Corps Expéditionnaire d'Orient (CEO) au nord de la Grèce).

[1411]Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Base française d'Italie, Parc Annexe d'Artillerie. Le Chef d'Escadron Scherer Commandant le P.A. de la Base à Monsieur le Commandant de la Base Française d'Italie, *op. cit*.

4. Liquidation des surplus britanniques en France et en Belgique. L'aventure industrielle du géant du désobusage Francis Norman Pickett.

4.1. FRANCIS NORMAN PICKETT. CET ILLUSTRE INCONNU DE L'ENTRE-DEUX-GUERRES.

« He is the discoverer of great secrets in the breaking down of hundreds of thousands of tons of ammunition, which was manufactured for the purpose of destroying humanity and civilization, and turning their metals into the avenues of manufacture for the peaceful progress of human requirements »[1412].

4.1.1 Francis Norman Pickett

Francis Norman Pickett naquit en 1885 à Ilfracombe (Devon) dans le sud de l'Angleterre. Après de brillantes études, il embrassa une carrière d'ingénieur en électromécanique. Son père, l'un des principaux entrepreneurs en travaux public de l'ouest de l'Angleterre, décéda très tôt et le jeune Francis Norman hérita non seulement de sa fortune mais aussi de son appétence pour l'innovation, une curiosité scientifique et un évident goût pour les affaires. Son travail porta ses fruits assez tôt et il se vit bientôt détenteur de près de douze brevets qui lui assuraient de substantielles et régulières rentrées d'argent. Pickett développa et breveta par exemple un nouvel électro-aimant puissant pour l'optimisation du levage de charges métalliques.

En 1919, il fonda sa propre entreprise de travail des métaux, de droit français, sous la raison sociale « F.N. Pickett & Fils ».

Il installa son siège, en France, à Wimereux dans le Boulonnais, dans l'actuel département du Pas-de-Calais. Passionné par la pratique du golf, par les sports mécaniques (courses automobiles) et les *Alsatian dogs,* une espèce rustique de berger-allemands (cf. Figure 203), il laissa son nom à un tournoi de golf (coupe Pickett) à Wimereux et un ouvrage dédié à la race de chiens de prédilection[1413].

Il fut un acteur majeur de la liquidation des restes de la Grande Guerre en France et en Belgique de par les tonnages qu'il élimina mais aussi par les méthodes et l'organisation qu'il sut développer et faire admettre *de facto* comme un standard auprès des autorités pour vider les obus, qu'ils soient chimiques ou explosifs, au prix de nombreuses pertes humaines en France et en Belgique.

[1412] « Il est le découvreur de grands secrets dans la manière de démolir des centaines de milliers de tonnes de munitions, produites dans le but de détruire l'Humanité et la civilisation, transformant leurs métaux dans avenues d'usines pour la paix et le progrès de l'Homme »

[1413] Pickett, F.N. M.I. Mech. E. *The book of The Alsatian Dog*. London. The weald press LtD. 1950.

Les activités de F.N. Pickett & Fils en France et Belgique sont relativement bien visibles et tracées dans les archives et ce pour trois raisons :

I. Pickett était la plus grandes des entreprises à direction britanniques en France dans l'entre-deux-guerres, dans un contexte où les relations franco-britanniques étaient tendues sur la question de la résolution de la paix avec l'Allemagne ; ce contexte motiva la production de nombreuses correspondances entre l'entreprise, le Ministère de la Guerre français, la direction du Service de Récupération des Munitions belge et le *Disposal Board* (le bureau britannique pour la liquidation des stocks) qui ont pu être collectées aux archives du Service Historique de la Défense (site de Vincennes, France), du Musée de l'armée à Evere (Belgique) ou encore aux archives nationales à Londres ;

II. Cette entreprise qui voulait à des fins commerciales libérer les sols de France et de Belgique des excédents encombrants de guerre présents sur les anciens secteurs britanniques fut fustigée par voie de presse lorsque des accidents se produisaient dans les usines, sans tenir compte de la célérité avec laquelle ces munitions qui menaçaient les populations étaient éliminées et les tonnages considérables en question. Nombreux sont les Articles dans la presse des années 20 qui évoquent les activités de Pickett au travers du prisme des incendies, accidents et autres nuisances occasionnées (pollution des eaux, dégâts matériel, anxiété, etc.) ;

III. F.N. Pickett fit faillite entraînant un audit détaillé et approfondi mené par le cabinet *Price Waterhouse*. Les archives de cet audit, très précises sur les activités de Pickett pour une recherche en responsabilité, relatant la chronologie des évènements, sont conservées aux archives nationales à Londres.

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 203 : La rencontre de deux intrépides britanniques. Francis Norman Pickett se tient à gauche de son chien. Cigarette à la main. A sa gauche, le Capitaine Worsley, commandant de l'expédition polaire Algarson. Non daté[1414].

[1414] Bibliothèque nationale de France. Capt. Worsley [à d., commandant de l'expédition polaire Algarsson] et M. Pickett [tenant un chien en laisse] (CNews) : [photographie de presse] / [Agence Rol] Agence Rol. Agence photographique (commanditaire).

4.1.2 Une organisation de l'entreprise privée d'inspiration militaire

Lorsqu'il s'installa en France, F.N. Pickett trouva dans ses camarades des armes savantes de l'Armée britannique son état-major. Le major A.D. Walls, déjà chargé par le gouvernement britannique du démontage des munitions et qui avait su instaurer pour cela des méthodes très efficaces, fut placé au poste de directeur général. Il s'entoura aussi de messieurs H.J. Garrard (directeur du département des ventes), L.K. Brindley (superintendant général), le capitaine M.H. Well (directeur des voies ferrées et du département des transports) et George Martin (directeur du secrétariat général). L'entreprise Pickett se dota donc d'un personnel militaire et structura son entreprise de façon très hiérarchique selon les codes de l'Armée. Deux personnages en poste dans la maison Pickett firent couler beaucoup d'encre et furent sujets à controverses et polémiques : le lieutenant-colonel russe Michael Kostevitch et le général Régnier.

Génie des poudres et explosifs et espion. Le controversé Michael Kostevitch

Le lieutenant-colonel Michael Kostevitch (cf. Figure 204), ingénieur chimiste et artilleur de l'Armée impériale russe, fut placé à la tête du département de la sécurité. Il fut en charge de l'inspection des usines de l'entreprises afin de s'assurer de la stricte application des standards, méthodes de démontage et de neutralisation des matériels de guerre et du respect des mesures de sécurité. Cet homme avait déjà fait parler de lui avant la Grande Guerre pour des déboires judiciaires. Kostevitch avait été mandaté par le Ministère russe des affaires étrangères pour conduire à Berlin des recherches sur la chimie des explosifs et la pyrotechnie.

Il fut arrêté en 1912 par les autorités allemandes pour espionnage des usines étatiques d'explosifs et de fabrication d'armes[1415]. On lui reprocha d'avoir cherché à surprendre les secrets de fabrication des matériels de la maison Erhardt, qui vendait son matériel en Russie, et en particulier un canon à frein hydraulique. Bien que les preuves de sa culpabilité n'aient pas été rassemblées, il fut écroué. Cette affaire, largement relayée par la presse française et allemande, jeta un froid dans les relations diplomatiques entre l'Allemagne et la Russie. Cette arrestation fut possiblement une réaction allemande à celle du commissaire Dressler par les autorités russes.

Figure 204 : Michael Kostevitch sous l'uniforme de l'armée impériale russe (non daté)[1416].

Le 24 juin 1912, le lieutenant Dahm du 46e Régiment d'Artillerie de campagne en garnison à Worfenbuttel fut arrêté à son tour en Russie où il fut envoyé pour se perfectionner en langue russe[1417]. Cette arrestation aviva la violente polémique par voie de presse provoquée par l'arrestation du capitaine Kostevitch. Les leviers diplomatiques et l'intervention de Nicolas II lui permirent *in fine* de sortir des geôles.

[1415] Bibliothèque nationale de France. « *Die Behaftung eines russicshen Offiziers in Berlin* », *Berliner Tagesblatt und Handels-Zeitung, Morgen Ausgabe*. Donnerstag den 27. Juni 1912, n°322.

[1416] Bibliothèque nationale de France.

[1417] Bibliothèque nationale de France. « *Nouvelles de l'étranger. Allemagne. Arrestation du capitaine Kostevitch à Berlin », Le Temps* du samedi 29 juin 1912.

L'excellence des recherches et du travail en ce qui concerne la démolition de munitions firent rapidement la renommée de Michael Kostevitch. Mais en 1921, une nouvelle polémique éclata autour du personnage alors entré comme inspecteur général de la sécurité au sein de la maison F.N. Pickett & Fils. On put lire dans *L'Egalité de Roubaix – Tourcoing* du 6 avril 1921 *« Après avoir trahi la Russie, l'Allemagne, la France et l'Angleterre, il continuait son industrie à nos dépens*[1418] ». Le chef d'accusation fut celui d'avoir à livrer à l'Allemagne « *le secret d'un obus perfectionné*[1419] ». Kostevitch fut arrêté séance tenante le 4 avril 1921 au motif d'espionnage au profit de l'Allemagne. Il fut écroué le 6 avril et déféré devant le Parquet. Il passa alors aux aveux, affirmant qu'il avait bien recopié des plans pour les livrer aux Allemands. Suite à l'intervention d'un officier du Ministère de la Guerre russe, il fut remis en liberté provisoire le 14 avril 1921.

L'affaire ne fit que renchérir la méfiance des autorités françaises à l'égard de l'entreprise F.N. Pickett & Fils, entreprise de droit français mais dirigée par et pour des Britanniques sur le sol français et au sein de laquelle œuvrait dans la direction un officier russe, dans un contexte de différends depuis les conférences pour la paix de 1919 entre Français et leurs anciens alliés et la peur partagée de l'expansion à l'ouest de la vague rouge bolchévique. L'image de l'entreprise était déjà entachée par mauvaise presse par une autre affaire, celle du général Régnier, et aussi par des accidents mortels survenus dans les usines de F.N. Pickett & Fils.

Kostevitch était encore premier inspecteur technique et coordinateur des opérations de destruction chez Pickett en 1922. L'année 1934 fut pour M. Kostevitch celle de la consécration en France. Il fut décoré de la médaille d'or de la Corporation des Académiciens Artilleurs de l'Emigration russe (blanche, *White Emigration*) au titre de « *la reconnaissance pour ses travaux scientifiques brillants dans le domaine des poudres, des explosifs et des gaz de combat publiés entre 1908 et 1934 en Russie comme à l'étranger*[1420] ». Pourtant depuis son domicile de Passy, il écrivit une lettre le 24 avril 1934 en s'exprimant dans ces termes « *ma situation en France est très, très, difficile. On m'a même interdit de travailler. J'ai à présent de gros soucis parce que j'ai eu à échanger la belle France avec un autre pays… Ceci est pour moi une profonde déception*[1421] ». Kostevitch quitta en effet la France pour l'Amérique du sud et l'Equateur où il prit un poste au sein du Ministère de la Défense Nationale (*Ministerio de Defensa Nacional*)[1422]. Il publia en 1935, depuis la Yougoslavie « *G. Burning Ground. Gas Casualities Ordnance Clearing Station* ». En septembre 1937, à l'âge de 60 ans, il fut élevé au grade de Commandeur, ce que seulement cinq personnalités avec lui réussirent à faire. Ses derniers écrits identifiés remontent à 1944[1423].

Kostevitch fut profondément marqué par l'explosion catastrophique du dépôt de munitions de Kazan, en Russie (sur la Volga), causée par des conditions déplorables de stockage et de manipulation des munitions et des explosifs. Il y apprit que la clé de la sécurité de ces grands dépôts était l'entreposage de chaque type d'engins isolément.

[1418] Bibliothèque nationale de France. *L'Egalité de Roubaix – Tourcoing* du 6 avril 1921.

[1419] Bibliothèque nationale de France. « *Kostevitch en liberté provisoire* », *Mémorial de la Loire et de la Haute-Loire*. 16 avril 1921.

[1420] « *Personalnotiz Oberst Dr. Michael Kostevitch, 60 Jahre alt* », *Zeitschrift für das gesamte Schieß- und Sprengstoffwesen mit Sonderabteilung Gasschutz*. Begründet von Dr. Richard Escales. Herausgeben von Dr. August Schrimpff. XXXII. Jahrgang. München, 1937, pp 319-320.

[1421] *Ibid.*

[1422] Kostevitch Michael (1944). *Methods for the Safeburning out of Lyddite and other Shells*. II Edition. Buenos Aires. 1944.

[1423]. M. Kostevitch Michael DR. T. SC. Military Chemical Enginneer and Technologist, Professsor of Chemsitry, formely Colonel of Imperial Russian Guard Artillery. *Some of the scientific and technological printed work.*

Il déclina alors les procédés de démolition selon la nature et l'état du chargement des engins à rebuter. Kostevitch prôna la « Taylorisation » du stockage et de la destruction des munitions et l'usage d'approches scientifiques pour la neutralisation d'engins chimiques ou explosifs. Le principe était simple : pour chaque type de projectile, une zone de stockage isolée et une méthode de démolition spécifique ad hoc.

Dans le collimateur de la justice. Le Général Régnier

Colonel en décembre 1914, Régnier (cf. Figure 161) avait rempli durant la guerre des fonctions de la plus haute importance. Directeur de l'Ecole pyrotechnique de Bourges pendant les épisodes les plus critiques de la crise des munitions, directeur de l'aéronautique au sein du Ministère de la Guerre, puis nommé général commandant de l'Artillerie d'un corps d'armée en Champagne et dans le secteur est de Verdun (Woëvre, 6e Région militaire), le général Régnier avait terminé la guerre comme aide-major général auprès du GQG sous les ordres du général Pétain. Nommé général de division et commandeur de la Légion d'honneur en janvier 1921, investi par le gouvernement britannique de l'ordre du Ban, le général Régnier apporta à la firme F.N. Pickett & Fils « *non seulement le concours d'un technicien de haut rang, mais aussi le service d'un grand serviteur de l'Etat* »[1424].

Régnier, à l'aune de sa retraite, demanda une mise en congé et intégra l'entreprise F.N. Pickett & Fils au début de l'année 1921 en tant qu'inspecteur général[1425], une prise de poste qui causa au général des déboires judiciaires. André Paisant, Sous-Secrétaire d'Etat au Ravitaillement et à la Liquidation des Stocks, fut amené, en vertu de circulaires du Garde des Sceaux, à saisir ce dernier des cas d'anciens fonctionnaires de la Liquidation des Stocks, tombant sous le coup de l'application de l'Article 10 de la loi des finances du 6 octobre 1919, qui interdisait aux fonctionnaires d'accepter des emplois avant un délai de 5 ans dans une entreprise privée, avec laquelle ils avaient pu traiter des marchés ou des affaires, rentrant dans les attributions de leur service.

Le général fit l'objet d'une plainte déposée par André Paisant auprès du Garde des Sceaux pour vol et entrave à l'Article 175 du code pénal[1426], aussitôt suivie d'une virulente campagne dans la presse à son encontre. L'affaire fut portée devant le Sénat lors de la séance du 9 juin 1921, en présence de Louis Barthou, Ministre de la Guerre. Le général Hirschauer, Sénateur de la Moselle, prit la défense de son ancien compagnon d'armes en mettant en avant l'excellence de ses états de service durant la Grande Guerre. Régnier fut débouté sur le motif qu'il n'eut jamais aucun intérêt ni lien de droit dans l'entreprise Pickett au moment de la passation du marché du 20 mai 1920 (entre F.N. Pickett & Fils et le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) et qu'il pouvait librement intégrer cette firme[1427].

[1424] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Désarmement du sol*, *op. cit.*

[1425] The National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *F N Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit.* p.34.

[1426] Tout fonctionnaire, tout officier public, tout agent du Gouvernement, qui, soit ouvertement, soit par actes simulés, soit par interposition de personnes, aura pris ou reçu quelque intérêt que ce soit dans les actes, adjudications, entreprises ou régies dont il a ou avait, au temps de l'acte, en tout ou en partie, l'administration ou la surveillance, sera puni d'un emprisonnement de six mois au moins et de deux ans au plus.

[1427] Bibliothèque nationale de France. *Journal officiel de la République française. Débats parlementaires*. Sénat : compte rendu in-extenso. 09 juin 1921.

La question reste ici posée si le général Régnier prit réellement des intérêts chez Pickett, s'il bénéficia ou non d'une impunité au titre de ses faits de guerre avec le soutien des généraux relégués dans la nouvelle administration civile du temps de paix au second rang. Jusqu'à quelle date Régnier se maintint en poste au sein de l'entreprise F.N. Pickett & Fils reste une question en suspens[1428].

4.2. L'EXPLOITATION POUSSIVE DE LA *C-FACTORY*. L'ERADICATION DES DEPOTS EX-ALLEMANDS DE TRELON & LIESSIES

L'aventure industrielle de F.N. Pickett & Fils sur le continent démarra dans le Nord, aux confins de ce département, de celui de l'Aisne et de la frontière belge, dans l'Avesnois, en pleine forêt, à Trélon et Liessies.

4.2.1 Mainmise française sur le dépôt ex-allemand de la VIIe Armée prussienne devenu dépôt majeur de rassemblement durant la sortie de guerre

La contre-offensive alliée de l'automne 1918 fut stoppée par la demande allemande d'armistice. Le front progressant vers la frontière allemande se figea dans le secteur de Trélon non loin de là où, à La Capelle, les plénipotentiaires allemands entrèrent sur le territoire français pour aller signer dans l'Oise la fin des hostilités.

La VIIe Armée prussienne avait installé dans la forêt de Trélon, entre les bourgs de Trélon et Liessies (cf. Figure 208), un important dépôt de munitions de tous calibres, dissimulé par un dense couvert forestier (cf. Figure 205). Le dépôt fut en partie endommagé par les Allemands au moment de leur retraite par des explosions volontaires selon leur tactique de la « Terre brûlée ». Le dépôt était organisé en deux entités avec d'une part, le parc nord (dit du « Bois l'Abbé » positionné sur la commune de Liessies) et d'autre part le parc sud (dit du « Parc Jeannette » sur la commune de Trélon), raccordés par une voie de chemin de fer à écartement normal. Des quais avait été installés pour procéder aux opérations de chargement et déchargement (cf. Figure 205). Chaque entité était formée par une ensemble d'îlots à sous-bassements maçonnés desservis par trois branches à voies normales bien visibles par imagerie LiDAR (Parc Jeannette, cf. Figure 209). Elles s'étendaient sur environ 500 m de long. Quand l'Armée française prit enfin possession du secteur de Trélon le 10 novembre, elle se considéra «*comme propriétaire de tous les matériels militaires* [1429]», que ceux-ci soient stockés sur des terrains publics ou dans des propriétés privées, mais « *le parc à munitions qui contient tout l'approvisionnement de la septième armée prussienne est si vaste, les mines si nombreuses qu'on ne peut l'empêcher de sauter*[1430] ». Bien qu'un rapport en 1923[1431] rappelle que les explosions avaient été provoquées par les Allemands, ce n'est que « *le 15 novembre que le parc à munitions commence à sauter* ». En 1919, et comme sur de nombreux autres sites, l'Armée ne put s'engager avec l'aide de PG qu'à des destructions partielles par pétardement dans la zone sud du parc (Trélon), déjà affectée par les explosions de novembre 1918, tout en essayant de protéger la zone nord des intrusions.

[1428] Un cas similaire à celui du général Régnier fut également signalé au garde des sceaux, par le Sous-Secrétaire d'Etat au Ravitaillement, celui d'un ancien capitaine d'artillerie, inspecteur des munitions à la 2e Région, qui était chargé de l'examen des projets de contrat de destruction des munitions du camp de Sissonne. Démissionnaire, cet officier entra, dans la suite, aux usines de la Société Barthas, 38 rue Etienne-Marcel, à Paris, pour laquelle il eut à donner des avis favorables pour la conclusion de marchés.

[1429] M.A. Buthine (1932). *Entre l'enclume et le marteau (1914-1918).*

[1430] Ibid (Extrait): « les explosions sont formidables, les citernes se fissurent, les maisons (de la commune la plus proche) se lézardent …nous ne passons pas une nuit sans être réveillés par ces explosions ».

[1431] De St-Sauveur. Compte-rendu le 16 juillet 1923 au sujet de sa visite du parc le 6 juillet. Paris.

De nombreuses munitions partiellement ou non éclatées pouvaient subsister à l'issue de ce premier travail de « nettoyage » mais c'est surtout contre la violence des explosions « *et les émanations des obus toxiques* » que la Société des Anciens Combattants des deux communes les plus proches et au sud du parc à munitions protestèrent auprès du Ministère de la Guerre[1432] « *[...] les Anciens Combattants réclament instamment et en réel accord avec la population toute entière que le parc soit purement et simplement dissous ainsi que le prévoit l'Article 12 du décret du 15 octobre 1919*[1433]». Ces anciens combattants étaient excédés par ces rejeux de la guerre dans un temps pacifié et/ou étaient-ils les portes paroles les plus crédibles d'une population de sinistrés angoissée à la vue des monceaux de munitions délaissées par les Allemands ? Mais le Ministère de la Guerre prit un autre parti à 180° de celui des anciens combattants, non pas de le faire fondre le dépôt mais à contrario de le faire enfler en devenant un centre de rassemblement.

Le dépôt de Trélon et Liessies rassemblait en 1919, 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes. Le dépôt aurait ainsi renfermé de l'ordre de 2 000 000 de projectiles, pour l'essentiel de gros calibre, explosifs et chimiques[1434]. Les observations et mesures de terrain effectuées dans le cadre de cette recherche confirment que (i) le dépôt contenait bien des engins chimiques, dont des munitions arséniées à *Croix bleue*, (ii) des projectiles de tranchée. Certains clichés issus d'archives privées montrent (i) la présence dans ce dépôt de bombes d'aviation allemandes pisciformes de 1 200 kg (cf. Figure 206), et (ii) localement, des munitions entreposées en amas désordonnés (cf. Figure 207). L'hypothèse selon laquelle les quantités de munitions détruites à Trélon et Liessies ne firent qu'enfler durant la période de sortie de guerre semble crédible au regard des renseignements collectés dans les archives. En effet, dans le Pas-de-Calais, les opérations de rassemblement des REG débutèrent en février 1920 pour s'achever en septembre 1921 et furent ralenties par le manque de wagons et possiblement aussi par l'encombrement des voies « *Les engins ne présentant pas de dangers dans leur manipulation ont été rassemblés dans les dépôts desservis par la voie normale en vue de leur transport sur les Usines Pickett, à Dannes Camiers et Bois-l'Abbé pour leur destruction. Des retards dans l'évacuation de ces dépôts ont été provoqués par le manque de wagons. Cependant, les opérations, commencées en Février 1920, furent terminées en Septembre 1921*[1435] » (p.486). Ce qui allait devenir la *C-Factory*, isolée en forêt, loin des terrains bouleversés des anciens champs de bataille et des terres réinvesties par les déplacés et sinistrés, devint le centre de rassemblement des munitions chimiques issues de la récupération dans le département du Pas-de-Calais. Le site de Trélon Liessies offrait les meilleures garanties de sécurité et de facilité de transport, là où une entité, un exploitant aux reins financiers solides, avait déjà fait la preuve qu'il savait démolir de façon méthodique et industrielle ces masses d'engins chimiques qui inquiétaient les instances en charge de la liquidation des stocks et les autorités militaires « *Ces dépôts sont transportés à Bois-l'Abbé car la destruction de projectiles à gaz, dans les régions où les habitants sont en partie rentrés, présente de nombreux inconvénients*[1436] ».

[1432] Bibliothèque nationale de France. Extraits du *Journal de Fourmies* du 23/11/1919 et du *Bulletin des Réfugiés du département du Nord* du 10 décembre 1919. « *Les combattants […] portent à la connaissance de Monsieur le Président du Conseil […] que l'autorité militaire responsable de ces explosions [..] néglige de tenir compte de la direction du vent pour procéder à la destruction d'obus à gaz* » « *La Société des Anciens Combattants a adressé au président du Conseil un rapport–pétition sur les effets nocifs produits sur la population et en particulier les malades, les femmes et les enfants …* ».

[1433] Bibliothèque nationale de France. Extrait du *Journal de Fourmies* du 3 juin 1923

[1434] The National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit*. p.72.

[1435] Archives départementales du Pas-deCalais, site d'Arras. *Reconstitution des Régions Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927*. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin, *op. cit*, p. 486.

[1436] *Ibid,* p. 487.

Le rassemblement et les démolitions d'engins chimiques concernèrent en 1920 et 1921 essentiellement le parc nord, situé sur la commune de Liessies. C'est à cet endroit que se situe le terrain de brûlage, qui, au regard des pollutions des sols, était le plus vaste (cf. Section 3e du présent manuscrit).

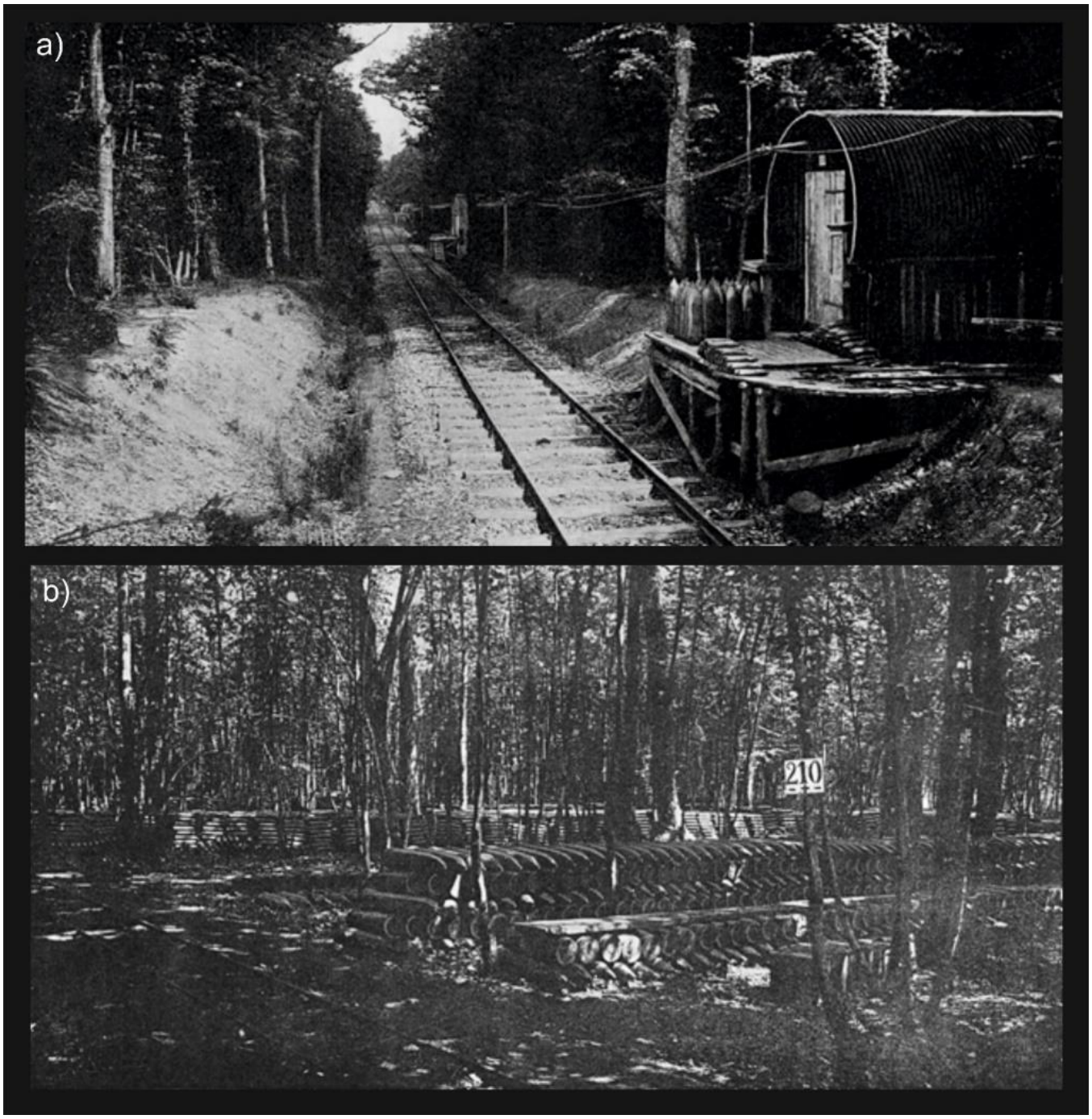


Figure 205 : Le dépôt de munitions de Trélon, vers 1920. a) quais de déchargement b) piles de munitions de gros calibre (210 mm) en sous-bois[1437].

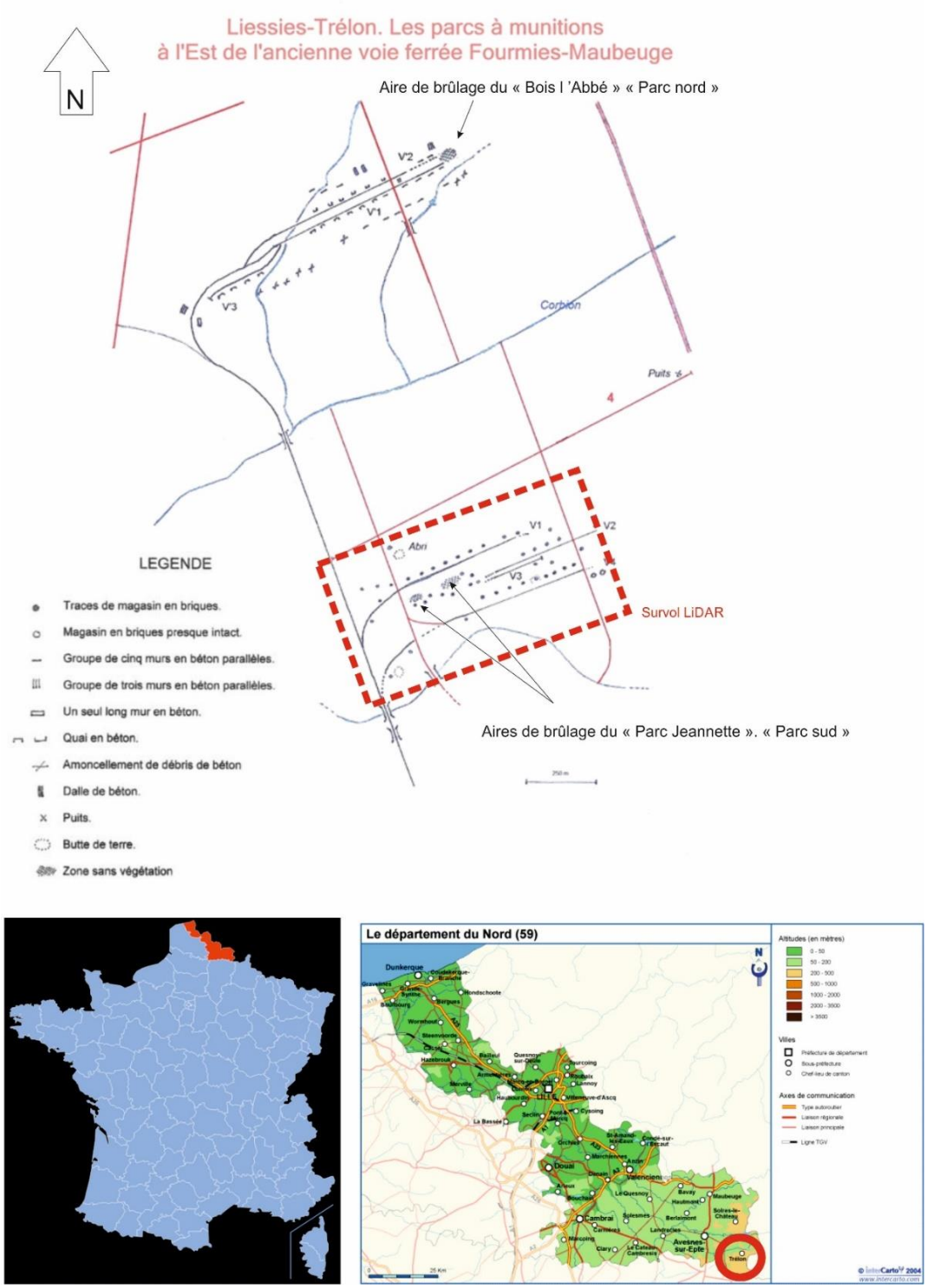
[1437] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, p. 76, p 77. *op. cit.*

Figure 206 : Un couple et leurs chiens posant sur une bombe d'aviation allemande de 1 200 kg, la plus lourde des bombes de la Grande Guerre. Le poids de ces engins, dont on devine à l'arrière-plan d'autres exemplaires, faisait plier les ailes des bombardiers lourds Gothas. L'empennage démonté se dresse à droite. Image saisissante d'une scène d'une grande banalité parmi des engins ex-allemands qui durant la Guerre ont semé peur, effroi et destruction. Usine de désobusage C-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils à Trélon. Vers 1920[1438].

Figure 207 : Un jeune homme bien apprêté pose avec une posture provoquante devant des amas de munitions désordonnés du dépôt forestier de munitions de Trélon. Non daté[1439].

[1438] Collection particulière Philippe. Communication personnelle.

[1439] *Ibid.*



208 : Les parcs à munition nord (« Bois l'Abbé » à Liessies) et sud (« Parc Jeannette » à Trélon). Cartographie des vestiges des anciens dépôts et de l'usine F.N. Pickett & Fils C-Factory[1440].

[1440] Relevé de terrain A Focquenoy (Trélon). Communication personnelle.

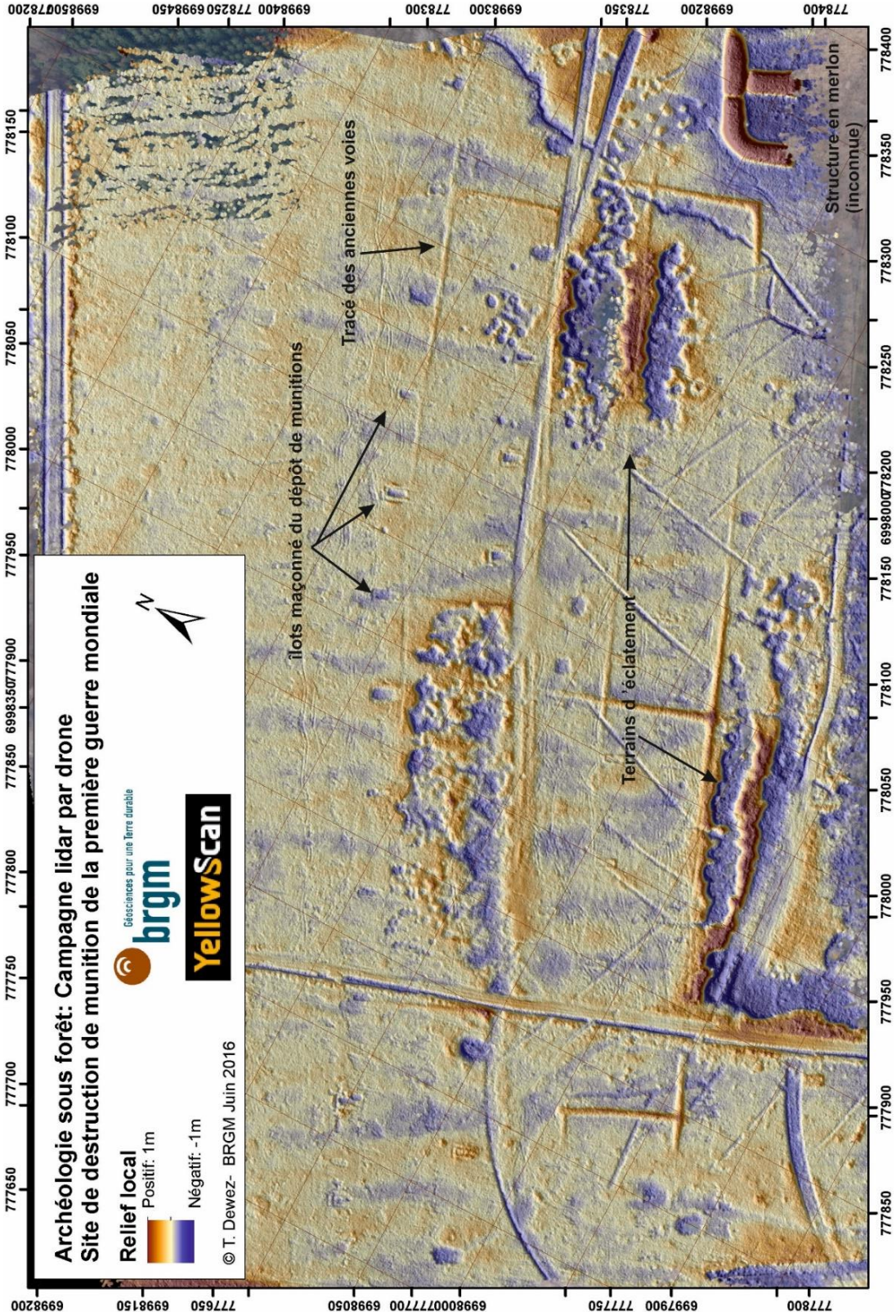


Figure 209 : Cartographie LiDAR du parc à munitions sud (Parc Jeannette) à Trélon (BRGM, 2016).

4.2.2 L'attribution à F.N. Pickett & Fils du premier marché du « Temps de Guerre » de l'entre-deux-guerres

Le pouvoir de persuasion des associations d'anciens combattants amena l'Etat français à solutionner la question du dépôt de munitions de Trélon & Liessies dans les plus brefs délais. Le Ministère de la Guerre français s'était aussi fixé plus généralement comme priorité l'élimination des dépôts de munitions ex-allemandes. Le 19 mai 1920, l'entreprise F.N. Pickett & Fils fut rendue adjudicataire du premier marché du « Temps de Guerre » par le Commandement de l'Artillerie de la 1er Région militaire (direction de Douai, département du Nord) opérant pour le Ministère des Finances (Service de la Liquidation des stocks).

Rien dans les archives du Service Historique de la Défense ne laisse entrevoir pour l'attribution de ce marché une quelconque mise en concurrence. Comme pour Clere & Schwander en 1919, le marché Pickett de Trélon aurait été conclu en gré à gré selon les conditions du Code des marchés publics, qui offrait la possibilité d'une procédure simplifiée et accélérée (le Décret du 18 novembre 1882 et l'instruction du 31 juillet 1889 relatifs aux adjudications publiques et aux marchés passés au nom de l'Etat)[1441]. Il est donc vraisemblable que le recours au gré à gré répondît aux clauses d'impérieuse nécessité, pour réduire au maximum les délais entre la contractualisation et l'engagement opérationnel des destructions des dépôts visés par les marchés.

Pourtant l'affaire Régnier apporte des éléments qui pourraient contredire l'hypothèse d'un gré à gré et mettre en exergue l'existence d'une possible consultation préalablement à l'adjudication. D'après le général Hirschauer, entendu sur cette affaire devant le Sénat lors de la séance du 9 juin 1921, et qui prit la défense du général Régnier, « *Parmi les maisons qui sollicitèrent ces marchés figurait une maison anglaise : la maison Pickett ; il inscrivit cette maison la troisième sur la liste*[1442] ». Le général Régnier, pour sa défense, avait fourni un ensemble d'explications au procureur qui déclarait le 8 avril 1921 « [….] *que jamais le Général Régnier n'a eu à exercer un contrôle direct ou indirect sur la maison Pickett* ; *que dans le seul marché où il eut à intervenir, il en avait proposé l'attribution à une autre maison [ndlr : Rozier] et que la maison Pickett avait été désigné contrairement à son avis*[1443] ».

Finalement la firme F.N. Pickett & Fils fut déclarée « *le mieux offrant*[1444] » et rendue adjudicataire. F.N. Pickett & Fils pouvait, au terme du contrat, disposer des métaux récupérables, après neutralisation des engins, « *moyennant le versement au Trésor, de redevances calculées à raison de 20 francs/tonne d'engins explosifs, 15 francs/tonne d'engins toxiques et 600 francs/tonne de laiton*[1445] ».

[1441] Fait à Paris, le 18 novembre 1882. Signé : Jules Grévy. Par le Président de la République : Le Ministre des finances, Signé : P. Tirard.

[1442] Bibliothèque nationale de France. *L'Écho : grand quotidien d'information du Centre Ouest*. 11 juin 1921.

[1443] Bibliothèque nationale de France. *L'Express du Midi : journal quotidien de Toulouse et du Sud-Ouest* ["puis" organe quotidien de défense sociale et religieuse "puis" organe régional de redressement national, de défense religieuse et de progrès social]. 10 juin 1921.

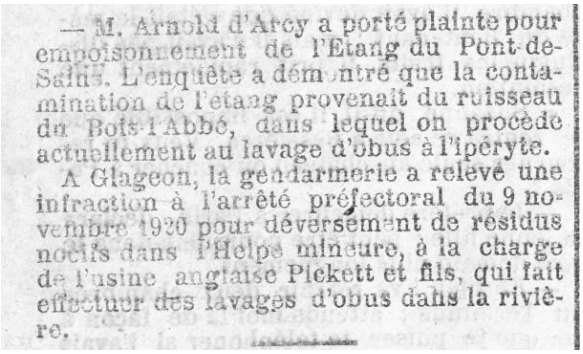
[1444] Bibliothèque nationale de France. *Journal officiel de la République française. Débats parlementaires. Sénat : compte rendu in-extenso*. 09 juin 1921.

[1445] *Ibid.*

En 1930, l'administration militaire s'interrogea sur « les tolérances » accordées à l'entreprise F.N. Pickett & Fils dans le cadre du marché conclu en gré à gré[1446]. Par quels leviers, Pickett obtint le contrat de Trélon, reste à ce stade de la recherche une énigme.

4.2.3 Des débuts d'exploitation chaotique du chantier de la *C-Factory* de Trélon

L'usine fonctionna à l'automne 1920 car, à partir de novembre 1920 et durant une partie de l'année 1921, des infractions furent relevées et des plaintes déposées par des propriétaires et une société de pêche pour pollution du cours d'eau et des étangs en aval du ruisseau du parc nord (Bois l'Abbé) *« dans lequel on procède au lavage d'obus à l'Ypérite[1447]* »


— M. Arnold d'Arcy a porté plainte pour empoisonnement de l'Etang du Pont-de-Salins. L'enquête a démontré que la contamination de l'étang provenait du ruisseau du Bois-l'Abbé, dans lequel on procède actuellement au lavage d'obus à l'ipéryte.

A Glageon, la gendarmerie a relevé une infraction à l'arrêté préfectoral du 9 novembre 1920 pour déversement de résidus nocifs dans l'Helpe mineure, à la charge de l'usine anglaise Pickett et fils, qui fait effectuer des lavages d'obus dans la rivière.

Figure 210 : Extrait du Journal de Fourmies, 27 novembre 1921.

F.N. Pickett investit 50 000 livres *Sterling* pour ériger l'usine de Trélon qui prit le nom de « *C-Factory »[1448]*. L'usine fut reconnue et classée (selon la loi du 19 décembre 1917 modifiée relative aux établissements dangereux, insalubres ou incommodes) par arrêté préfectoral du 2 mai 1921 mais son directeur, le général Suggett, fut toutefois condamné en novembre 1921 pour « *empoisonnement (de la rivière sur plusieurs kilomètres) par l'acide picrique[1449]* ». Pour mener à bien ses opérations de démolition des engins ex-allemands, selon les exigences contractuelles, F.N. Pickett & Fils avait absolument besoin d'un terrain sur lequel installer une aire de brûlage (*Burning Ground*). L'entreprise s'était installée au plus près du « gisement » du dépôt de Trélon, dans un environnement forestier. Le premier écueil qu'eut à surmonter F.N. Pickett & Fils fut, comme pour Clere & Schwander en Meuse et en Alsace, la nébuleuse administrative, mouvante, sur fond de bras de fer entre autorités civiles et militaires, dans laquelle devait s'inscrire cette activité industrielle temporaire. A Trélon, l'Administration des Eaux & Forêts n'autorisa pas le Ministère de la Guerre à procéder aux coupes d'arbres et de buissons impératives à l'érection d'installations industrielles. C'est au terme de plusieurs mois de discussions que l'entreprise réussit à sécuriser et stabiliser son usine en forêt. Les autorisations tardèrent à venir, mettant en *stand-by* tout ou partie de l'activité. En août 1921, soit plus d'un an après la passation du marché, la situation se débloqua enfin lorsque le gouvernement français fut contraint d'admettre que les munitions chimiques allemandes ne pouvaient être détruites sans aire de brûlage. Les coupes avaient été rendu administrativement possibles mais au prix de lourdes procédures : « *L'administration des Eaux & Forêts » avait de nouveau le contrôle des arbres* ». « *On ne pouvait couper un seul sans l'autorisation du Ministre de l'agriculture[1450]* ».

[1446] Service Historique de la Défense. Année 1930. 1re Région. Place de Douai. Rapport particulier de la place de Douai n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

[1447] Bibliothèque nationale de France. Extrait du *Journal de Fourmies* du 17 mai 1921 : « […] la gendarmerie a relevé une infraction à l'arrêté préfectoral du 9 novembre 1920 pour déversements de résidus nocifs … ».

[1448] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit,* p. 27.

[1449] Bibliothèque nationale de France. Extrait du *Journal de Fourmies* du 27 novembre 1921 : « […] Le tribunal a déclaré les anglais Pickett et fils entrepreneurs de désobusage amnistiés, mais condamné leur directeur, Tom Sugget … »

[1450] Bibliothèque nationale de France. *Figaro : journal non politique*. 30 mai 1921.

Le journaliste P. Soulaine fit ici certainement référence dans sa tribune du *Figaro* du 30 mai 1921 à cet épisode, qui pointait les lourdeurs et les aberrations de l'administration civile voulant restaurer cahin caha des droits, règles ordinaires en vigueur dans l'avant-guerre, mais rendus totalement inadaptés aux circonstances exceptionnelles imposées par l'élimination de l'arsenal hérité de la guerre.

Peu satisfaite des conditions qui lui furent accordées pour s'installer dans la forêt domaniale du Bois l'Abbé afin de traiter les tonnes de munitions ex-allemandes et souhaitant apparemment se réinstaller sur la zone sud plus proche des embranchements ferroviaires d'où arrivèrent d'autres munitions à démonter ou à détruire provenant de ses « *usines britanniques*[1451] »,) la société Pickett bénéficia de plusieurs avenants à son contrat et de redevances au Trésor réduites et obtint toute liberté pour installer en zone sud un terrain de brûlage des munitions toxiques.

4.2.4 Révision des exigences et du contrat initial par avenants

F.N. Pickett & Fils, comme d'autres désobuseurs (Aigret & Sauron, Bouxin, etc.), face aux difficultés inédites rencontrées par ces derniers dans l'exécution opérationnelle de leurs engagements contractuels, virent les exigences des donneurs d'ordre, le Sous-Secrétariat à la Liquidation des Stocks et le Ministère de la Guerre, revus à la baisse pour ne pas entraver la marche des opérations et menacer l'atteinte d'un des objectifs premiers de « l'aliénation » des munitions, à savoir la protection de la population. Huit avenants successifs au contrat initial furent nécessaires en vue d'assurer la réalisation complète « *dans des conditions particulièrement délicates*[1452] » de l'objet du contrat, produits notamment en vue de réduire les redevances dues par Pickett au Trésor, pour lui permettre d'investir dans une voie ferrée nécessaires pour transporter les matériels et munitions sur son nouveau terrain de brûlage du Bois Jeannette (avenant n°3). Le terrain du parc sud (Jeannette) sur lequel Pickett entreprit ses démolitions ne lui fut jamais attribué après expropriation puisqu'en « *exécution d'une dépêche ministérielle du 2 avril 1924*[1453] », le chargé de l'annexe magasin de l'Artillerie de Maubeuge fut toujours dans l'obligation de négocier avec le propriétaire privé (appartenant à l'Aristocratie locale) où se situait cette zone du parc, la location d'une parcelle de terrain, « *d'une superficie de 2 hectares environ, laissée à la disposition du service de désobusage comme champ d'explosion*[1454] ». Ces parcelles appartiennent encore toujours à ce jour à des propriétaires privés de l'Aristocratie locale. A partir du mercredi 1er février 1922 et jusqu'au 12 juillet 1923, les brûlages d'explosifs « *sur les champs de brûlage de l'usine* » se poursuivirent dans ces conditions, suivant un règlement établi par le seul industriel[1455]. Les observations de terrain ainsi que l'imagerie LiDAR (cf. Figure 209) montrent à ce jour clairement qu'il y eut des destructions de munitions par pétardement mais aussi par l'exploitation d'au moins deux *Burning Grounds* (terrains de brûlage) au droit du parc sud dit « Jeannette ».

[1451] *The National Archives, Kew Gardens, London.* Extrait des pages 7 et 8 de : *« F.N. Pickett & Son : Report upon the financial position and the financial results of contracts for the breaking down of ammunition in France and England to 27th September 1922 and later. French contract […] the French Government were in a position to delay the work and breaking down in each of the seven British factories and greatly increase the cost simply by imposing more stringent safety precautions ».*

[1452] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Année 1930. 1re Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30, *op. cit*, p. 5.

[1453] *Ibid.*

[1454] *Lettre de Maubeuge* en date du 15 avril 1924 et texte de « convention tenant lieu de bail de location ».

[1455] Réglementation en date du 6 février 1922 établie par F.N. Pickett & fils.

4.2.5 Déchargement des munitions et fonctionnement de la *C-Factory*

Pickett traita les Restes Explosifs de Guerre dans le but de les neutraliser et à des fins de récupérations par (i) pétardement dans un champ d'explosifs (parc sud), mais aussi (ii) par brûlage et encore (iii) par fusion à l'eau chaude (cf. Section 11h), procédés par lequel des centaines de milliers d'engins furent vidés de leur contenu explosif[1456]. Le brûlage était souvent la seule solution fiable pour le déchargement car en effet, les munitions ex-allemandes de la fin de la guerre entreposées à Trélon Liessies possédaient un chargement de piètre qualité qui ne se laissait pas aisément solubiliser à l'eau chaude. L'orientation des projectiles vers le procédé le plus approprié était décidée après l'inspection du contenu au terme du retrait des fusées et gaines d'éclatement (désamorçage) « *After the worker has removed the fuse or head of the shell, the filling is examined carefully with a view to decision as to whether it is to go at once to the washing-out plant or if its dispatch thither is to be postponed*[1457] ». La *C-Factory* employa jusqu'à 300 personnes.

4.2.6 Une parade face aux plaintes et accusations pour nuisances et mises en danger

Avec le déchargement des obus chimiques, les nuisances dues aux explosions et aux fumées reprirent et avec elles les plaintes, qui, bien que souvent relayées par la mairie de la commune la plus proche, ne furent pas reconnues par Pickett rejetant la responsabilité sur des tiers « *le Service de Récupération* [qui] *procède à la destruction des projectiles avariés* » ou « *l'explosion provoquée par un projectile étranger à notre production* ». Il est vraisemblable que parallèlement aux activités de déchargement des munitions de F.N. Pickett & Fils à Trélon Liessies, d'autres opérations de destruction des REG de ce site aient été opérées par le Service du Désobusage sous la responsabilité du Ministère de la Guerre (possiblement par l'exploitation du terrain d'explosion du parc Jeannette (parc sud) (cf., Figure 209). En ce qui concerne les « gaz » de combat, Pickett affirma que « *jamais nos installations n'ont brûlés ces soi-disant toxiques, asphyxiants. Nous brûlons, tout bonnement 10 % de Croix bleues qui contiennent un gaz lacrymogène et non asphyxiant*[1458] !».

Les accidents se multiplièrent aussi au sein de l'usine C. Suite à ceux de fin juin et du 1er août 1922, le Commandant de l'Artillerie usa d'un argumentaire pour justifier, face aux détracteurs, le choix par l'Artillerie de la solution Pickett. On retrouve ici étonnamment un argumentaire fréquemment utilisé, encore de nos jours, pour faire accepter par la population générale les nuisances et les risques subits par des activités industrielles dangereuses (i) le chantage à l'emploi ou les effets bénéfiques des activités sur l'emploi local, (ii) les effets sur les populations, minimisés, pour dédramatiser la situation. L'Artillerie avança donc que :

- l'usine Pickett « *a fait diminuer considérablement le nombre de chômeurs dans la région* »
- « *les inconvénients signalés n'indisposent qu'une petite partie des localités* »
- « *ces explosions ont l'avantage de purger complètement le terrain et évitent peut-être de graves accidents ultérieurs* »
- et « *qu'en ce qui concerne les gaz, il ne s'agit que de fumées désagréables, irritantes peut-être mais sans effets toxiques, même s'il s'agit d'obus dits à gaz* [1459]».

[1456] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit*.

[1457] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit.* p. 73.

[1458] Lettre C.9a/8 de l'usine C de F.N. Pickett & fils en date du 4 juillet 1922.

[1459] Lettre n°217/4 en date du 10 août 1922.

D'autres justifications plus techniques et crédibles furent fournies par les bureaux de Bruxelles de la société - « *The Pickett Metal Corporation* » - après avoir visité la *C-Factory* le 15 février 1923 et constaté « *que le lot de munitions qui produit ces explosions ne peut être traité autrement sans courir le risque d'avoir de nombreux accidents parmi le personnel ouvrier et que laisser ces munitions plus longtemps serait un danger énorme, étant donné que la composition de l'explosif après un certain temps devient instable*[1460] ».

Suite aux explosions et aux blessés de mars 1923, les anciens combattants excédés s'adressèrent le 4 mai 1923[1461] au Ministère de la Guerre dans le but d'obtenir une réunion avec le Commandant de l'Artillerie. Cette réunion n'eut pas lieu car, après de nouveaux accidents les 28 juin et 4 juillet, le Ministère en question, par une dépêche au Commandant de l'Artillerie, fit connaître à l'industriel :

- « *Que la démolition des munitions toxiques stockées dans le parc est suspendue.*
- *Que les dites munitions seront transportées à l'usine de Dannes Camiers pour y être démolies*[1462] ».

4.2.7 Renforcement des contrôles et réorganisation sécuritaire des opérations de brûlage

Cette première décision de Paris fut suivie d'une visite, d'une inspection de l'usine de démolition le 6 juillet 1923 par le Directeur Adjoint des Munitions qui, dans son compte-rendu, reconnait[1463] :

- « *qu'il est difficile d'avoir la certitude que dans le brûlage de munitions de cette nature - des bombes de 300 kgs contenant 150 kgs d'explosif hexanitrodiphénylamine - qu'une détonation accidentelle ne se transmette pas* »,

Puis qu'il est nécessaire de ne brûler dans la zone sud que des engins contenant au maximum 100 kg d'explosifs et que, pour les engins chargés d'une quantité supérieure d'explosif, la réouverture de l'ancien champ de brûlage de la forêt domaniale (parc nord, Bois l'Abbé), plus éloigné des agglomérations, s'imposait. Une autorisation préfectorale fut prise pour deux mois pour le brûlage des poudres dans la forêt domaniale[1464], Pickett étant pour cela:

- « *tenu de remettre le terrain dans son état primitif, c'est à dire nivelé et débarrassé de toutes ferrailles et de tous éclats d'obus* »
- « *responsable de tous dommages causés au peuplement* (forestier), *autant par les explosions que par les fumées ou la chaleur résultant du brûlage des poudres … et de tous autres dommages* ».

[1460] Danloux, J. Communication personnelle.

[1461] Bibliothèque nationale de France. Extrait et rappel dans le *Journal de Fourmies* du 3 juin 1923 : « […] les Anciens Combattants réclament instamment et en réel accord avec la population toute entière que le parc soit purement et simplement dissous ainsi que le prévoit l'Article 12 du décret du 15 octobre 1919 ».

[1462] Lettre N°958/4 de l'Etat-Major de l'Artillerie à MM. F.N. Pickett et Fils et en date du 12 juillet 1923.

[1463] De St-Sauveur. Compte-rendu le 16 juillet 1923 au sujet de sa visite du parc le 6 juillet. Paris.

[1464] Autorisation préfectorale en date du 26 septembre 1923, établie à la demande du commandant l'Artillerie.

Toutefois, le Commandant de l'Artillerie maintint l'utilisation par l'autorité militaire de la zone sud (parc Jeannette), « *l'emploi de ce terrain s'imposant absolument pour la destruction des engins récupérés sur les anciens champs de bataille* » et refusa au préfet du Nord toute commission communale pour débattre du sujet[1465].

4.2.8 Clôture des opérations et du chantier de la *C-Factory* (août 1924)

Il fallut d'autres morts et blessés au cours du second semestre 1923, d'autres plaintes des anciens combattants et du Conseil Municipal de la commune de Trélon, une dernière intervention d'un élu du Nord (Daniel Vincent, devenu à cette époque Ministre du Travail et de l'Hygiène du 26 mars au 9 juin 1924) auprès de son collègue Ministre de la Guerre et un dernier arrangement local pour assurer la liquidation du dépôt de munitions pour que le Commandant de l'Artillerie puisse annoncer le 6 août 1924 que « l*es travaux effectués, tant par la Société F. N. Pickett et Fils que par le Service de Désobusage sont achevés*[1466] ». Cette annonce semble confirmer que le centre de rassemblement de Trélon Liessies fut liquidé par le Ministère de la Guerre par l'entremise de deux exploitants, F.N. Pickett & Fils d'une part et le Service du Désobusage d'autre part.

Si les populations locales étaient enfin soulagées et certaines munitions apparemment transférées par le Service de Désobusage de Maubeuge au fort de Cerfontaine, les entreprises (Gilbert puis Berge) qui succédèrent en forêt de Trélon quelque temps à Pickett à partir de 1925 ne s'occupèrent apparemment que du démantèlement des installations. Toutes les promesses administratives en matière de nettoyage et de dépollution ne furent guère suivies d'effets, qu'il s'agisse des écrits de la Préfecture sur la remise du terrain dans son « *état primitif* » ou des déclarations du Général Commandant l'Artillerie qui affirmait le 6 août 1924[1467] :

- « *Actuellement le personnel de la firme* (Pickett) *procède aux nettoyages et travaux de remises en état des terrains utilisés* » dans la zone nord
- et dans le « *même temps le personnel du Service de Désobusage procède au nettoyage de terrain utilisé pour les destructions* » de la zone sud du dépôt.

De nombreuses ruines sont encore actuellement visibles et le terrain de brûlage recouverts de résidus de brûlage riches en débris de fusées d'artillerie et munitions (cf. Section 4e du présent manuscrit). W. Gilbert, après avoir quitté la firme F.N. Pickett & Fils obtint après approbation du Ministère de la Guerre en août 1924 un marché pour la démolition des installations (baraques, voies ferrées, etc.) se trouvant sur le terrain du Bois l'Abbé à Liessies[1468].

4.2.9 Conclusion

Les deux dépôts de munitions ex-allemands, de Trélon d'une part et Liessies d'autre part, furent liquidés à compter de 1920 par deux exploitants dépendants du Ministère de la Guerre, l'entreprise F.N. Pickett & Fils et le Service du Désobusage.

[1465] Lettre du Général Commandant l'Artillerie du Ier Corps d'Armée à Monsieur le Préfet du Nord en date du 13 juillet 1923. La réunion d'experts concerne les communes de Bourbourg et de Looberghe, à proximité des dépôts de Zeneghem.

[1466] Lettres du Général Commandant l'Artillerie du 1er Corps d'Armée du 2 juin et du 6 août 1924.

[1467] *Ibid.*

[1468] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Année 1930. 1re Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930, *op. cit*, p. 16.

Dans l'historique de la liquidation des surplus de guerre de l'entre-deux-guerres, l'entreprise F.N. Pickett & Fils joua un rôle majeur et l'exploitation (à perte) de sa *C-Factory* fut pionnière et fit figure de démonstrateur, une vitrine rassurante qui lui permit de décrocher d'autres contrats majeurs avec le *Disposal Board* et son pendant belge. C'est à Trélon, qu'à l'initiative de Michael Kostevitch, les méthodes industrielles de déchargement sécurisé (à des fins de récupération rémunératrices) furent expérimentées. La démonstration des capacités techniques de Pickett en matière de déchargement de munitions chimiques dans sa *C-Factory* fit aussi de ce site un centre de rassemblement pour ce type d'engins à dénaturer récupérés dans le département du Pas-de-Calais. Le corpus archivistique relatif à ce site est d'une richesse rare comparativement à celui visant d'autres installations d'éradication industrielle de REG (à l'exception de la *B-Factory* de Westroozebeke) possiblement en lien avec (i) les tonnages traités, (ii) le caractère innovant de ces opérations qui furent aussi sources de nuisances et (iii) ce qu'il advint par la suite de l'entreprise Pickett (enquête suite à sa banqueroute).

On constate toutefois au regard de ces archives que bien peu d'éléments ressortent concernant l'organisation générale de l'usine C. Ces installations, établies *ex nihilo* à proximité des dépôts à liquider, dans un environnement forestier contraignant, étaient temporaires puisqu'elles ne furent exploitées que 4 ans durant. Les plans des installations font défaut. Des relevés GPS méticuleux au sol par des historiens locaux des ruines et des traces encore visibles dans la topographie et une imagerie aérienne LiDAR (cf. Figure 209) captée par drone au droit du Parc Jeannette par le BRGM en 2016 ont permis malgré tout de préciser l'organisation générale des deux dépôts de munitions (Bois l'Abbé au nord, et Parc Jeannette au sud) et du réseau de voies ferrées les desservant. Les deux aires de brûlage du Parc Jeannette (parc sud) et celle du Bois l'Abbé (parc nord) ont été parfaitement localisées car forment dans cette forêt des clairières aux sols dépourvus de toute végétation du fait des pollutions extrêmes des sols de surface laissées par les opérations de brûlage. Le terrain de pétardement du Parc Jeannette est aussi parfaitement visible sur l'image LiDAR.

Le site de la *C-Factory* apparaît au regard d'archives rares et exceptionnelles collectées et des reconnaissances de terrain, aéroportées, des caractérisations exploratoires réalisées dans le cadre de cette recherche (cf. Section 4e du présent manuscrit) comme essentiel pour la compréhension des pratiques d'éradications des REG par brûlage. Les pollutions des terrains de brûlage (*Burning Grounds*) du Parc Jeannette (parc sud, Trélon) et du Bois l'Abbé (parc nord, Liessies) sont les filles ainées de celles de la « Place à gaz ».

Figure 211 : Une équipe majoritairement féminine pose au sein d'un atelier de désamorçage de l'usine de F.N. Pickett & Fils C-Factory à Trélon. Au centre, Georgina Rouget, décédée accidentellement le 14 septembre 1923, décapitée suite à une explosion au sein de l'usine. Carte postale cédée par son arrière-petit-fils[1469].

Figure 212 : Une équipe de manœuvres pose durant une opération de préparation de tranchées de brûlage d'obus au lieudit « Bois Jeannette ». Usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon, département du Nord. Cette photographie reflète la structure très hiérarchique et pyramidale de l'entreprise. Au premier plan se tient, bien apprêté, un cadre (contremaître), puis derrière lui, les « anciens » expérimentés et à l'arrière-plan, les personnels les plus jeune[1470].

[1469] Collection particulière, Hubé, D.

[1470] Zéphyr Henri Bruniaux (le plus âgé, tenant un outil au centre de la photo). Collection particulière de Jacqueline Bruniaux, professeur honoraire de l'Education Nationale (Académie d'Amiens). Communication personnelle.

4.3. L'ASCENSION D'UN GEANT DU DESOBUSAGE INDUSTRIEL

« Treasure in the war dumps »[1471]

4.3.1 L'enchaînement des contrats et l'inflation des tonnages à détruire

F.N. Pickett créa une industrie nouvelle, celle du premier recyclage à grande échelle « *des milliers de tonnes de munitions construites dans le but de détruire l'humanité et la civilisation, en transformant leurs métaux en allées d'usine, pour le progrès pacifique des besoins de l'humanité* »[1472].

En novembre 1919, l'entreprise conclut un premier contrat avec le *Disposal Board* pour la récupération, le transport depuis le camp Des Attaques (au sud de Calais) vers celui de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais) des « cylindres à gaz », vides ou chargés pour leur ferraillage. Il s'agissait de projectiles chimiques dit « *Livens* « (60 000 à 70 000 « *poison gas cylinder*[1473] ») et de diverses bombonnes d'oxygène.

Le 19 mai 1920**,** F.N. Pickett fut rendu adjudicataire du premier marché du « Temps de Guerre » par le Commandement de l'Artillerie de la première Région militaire (direction de Douai, département du Nord) opérant pour le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) pour l'élimination des 25 000 tonnes de projectiles ex-allemands entreposées en forêt de Trélon. Ce contrat était désigné par « contrat français » par le *Disposal Board*. Malgré de nombreuses difficultés comme nous venons de le voir, Pickett sut faire la preuve dans sa *C-Factory* de ses capacités à adhérer aux cahiers des charges du Ministère de la Guerre.

Le *Disposal Board* britannique et le Service de Récupération de Munitions (SRM) belge furent mis en confiance par l'initiative et les résultats obtenus par Pickett dans sa *C-Factory* de l'Avesnois et virent en Pickett « la » solution à l'élimination de grandes quantités de projectiles qui encombraient les sols du nord de la France et de Flandre occidentale. Le 1er juin 1920 il signa son premier contrat avec le *Disposal Board*, le « contrat des cylindres » qui prévoyaient la vente par le Ministère de la Guerre britannique de tous les cylindres à gaz qu'ils soient pleins ou vides, qu'ils soient britanniques ou allemands mais collectés dans la zone britannique. Dans ce contrat, Pickett prit la responsabilité de leur démolition, quels que soit les engins.

Le 14 juin 1920, après moult négociations et de nombreux aller-retours au-dessus de la Manche, Pickett conclut un accord avec le Ministère des munitions britanniques pour l'achat de près de 350 000 tonnes de munitions, artifices, charges, gaz, engins incendiaires et propulseurs en tout genre britanniques entreposés sur le sol français et de 20 000 tonnes de matériel (estimés au 5 mai 1920). Ces munitions étaient stockées dans les dépôts d'Audruicq, de Dannes Camiers, de Saigneville, de Fresseneville et de Blargies, Zeneghem et Rouxménil. Les autorités britanniques décidèrent de ne pas rapatrier ces surplus de guerre mais de les faire neutraliser sur place, sur le continent, après cession à l'entrepreneur F.N. Pickett & Fils contre le paiement de 2 050 000 livres *Sterling* après versement d'un acompte, comptant de *250 000* livres *Sterling*[1474].

[1471] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Titre d'un Article paru dans la presse britannique au sujet de l'entreprise de F.N. Pickett & Fils. Date de parution et périodique inconnus.

[1472] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, op. cit.*

[1473] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7006. Memorandum RE F.N. Pickett et Fils contract with the british government for the breaking down of ammunition in France.

[1474] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*, *op. cit*, p. 28.

Le 25 septembre 1920, parmi les différentes entreprises qui se présentèrent pour concourir (mise en concurrence), la société F.N. Pickett & Fils fut déclarée adjudicataire de la destruction des stocks de munitions du camp de Sissonne (département de l'Aisne), du IIe Corps d'armée. L'industriel installa son chantier à proximité de la ferme de Jeoffrécourt, dans la partie sud-est du camp (non loin de la Malmaison). Les tonnages à démolir ne sont pas connus mais un relevé des munitions présentes sur ce chantier fait état de près de 1 100 000 projectiles[1475]. Il s'agissait comme pour le site de Trélon d'une contrat « français ». F.N. Pickett & Fils signa aussi le « contrat des munitions de petit calibre de Brest » (*Small Arms Contract*).

L'entreprise était risquée vu l'investissement initial. Par ailleurs jamais encore auparavant de telles quantités de munitions n'avaient été neutralisées dans un but commercial. La presse française fut admirative (*Le Figaro* datés des 28 et 31 mai 1921, intitulés *Le Désarmement du sol*, par le journaliste Pierre Soulaine) et ne tarit pas en louanges face au courage de ce jeune et ambitieux entrepreneur qui s'était lancé dans une aventure industrielle inusitée, un véritable défi.

Puis, F.N. Pickett signa un autre contrat le 24 avril 1921 désigné par « *contrat belge* » avec le gouvernement belge pour la neutralisation de 32 430 tonnes de munitions en Flandre occidentale (*West Vlaanderen*, région d'Ypres) où il ouvrit son usine *B-Factory* à Westroozebeke (Poelkapellen), pour y réceptionner et démolir les engins (britanniques, allemands et français) livrés par le Service de Destruction des Munitions (SDM). Pickett ne démolira que 27 930 tonnes. Les projectiles qui ne purent être transportés jusqu'à l'usine Pickett furent transportés au dépôt du SDM de Morhet, au sud-ouest de Bastogne, pour y être démolies.

Pickett séduisit et les tonnages d'engins à détruire qui lui furent confiés ne cessèrent d'enfler. Vers août 1921, le gouvernement britannique recontractualisa avec Pickett pour la démolition du dépôt de munitions ex-allemand établi à Bourbourg dans le département du Nord suite à l'abandon de l'exploitation du dépôt par un précédent industriel concessionnaire du *Disposal Board* nommé Cohen. Lorsqu'il entreprit ces démolitions, le tonnage visé s'élevait à 30 000 tonnes[1476]. La *M-Factory* de Bourbourg était opérationnelle début novembre 1921 date du premier état d'avancement hebdomadaire de Pickett pour cette usine qui neutralisa jusqu'à 660 tonnes de munitions par semaine[1477].

Cette situation se reproduisit avec le dépôt de rassemblement de Conteville dans la Somme qui appartenait à l'entreprise Armes Georges & Co en liquidation. F.N. Pickett & Fils et Armes Georges & Co ne réussirent pas à s'accorder concernant les conditions de transport des engins les plus gênants, les chimiques allemands, dans la plus grande des usines Pickett, la *D-Factory* à Dannes Camiers. Pickett s'était organisé pour démolir des engins de conception britannique qu'il maitrisait, et accepta de les réceptionner mais pas les engins de l'ancien ennemi. Le Gouvernement britannique demanda alors à Pickett de les rassembler pour les immerger dans la mer du Nord. Mais il n'en fit rien. L'exploitation de l'usine de Conteville fut couverte par un contrat daté de novembre 1921.

[1475] Communication personnelle.

[1476] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7006. Memorandum RE F.N. Pickett et Fils contract with the british government for the breaking down of ammunition in France.

[1477] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7012. Bourbourg Progress –Contd-

Le tonnage visé était d'environ 11 000 tonnes. Les démolitions débutèrent pourtant officiellement en août 1922 si on s'en tient aux premiers enregistrements sur les registres d'avancement des opérations de l'usine[1478]. Au regard de ces derniers, environ 25 200 tonnes d'engins y auraient été détruites. D'autres contrats britanniques complétèrent la constellation des contrats majeurs comme le « contrat de Mérignole », le « contrat des obus déceinturés » et le « contrat des munitions de petit calibre en Angleterre ».

F.N. Pickett & Fils fut consulté par le Général Commandant l'Artillerie du VIe Corps d'Armée le 7 octobre 1920 dans le but de conclure un marché pour la démolition des munitions d'origine française, allemande et américaines du camp de Châlons (actuel camp de Suippes dans le département de la Marne), pour un tonnage d'environ 20 000 tonnes, dont plus de la moitié constitué de projectiles chimiques majoritairement allemands[1479]. Pickett fit connaître par son courrier adressé au général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions, que l'entreprise se retirait du concours. En effet Pickett projetait de déplacer les munitions du camp de Châlons sur son usine de Sissonne (actuel camp de Sissonne dans le département de l'Aisne), transport qui s'avéra impossible « *étant donné que le dépôt de Châlons se trouve à 10 ou 15 kilomètres d'une ligne de chemin de fer à voie normale* [1480]».

L'entreprise fut à nouveau consultée du fait de ses compétences techniques reconnues dans le domaine de la démolition des munitions par l'Artillerie de la 1re Région militaire vers 1925 pour un marché (dénommé n° 59 visant le nettoyage et le nivellement des terrains d'explosion ayant été exploité par le service du désobusage à Neuville Saint Waast, dans le Pas-de-Calais). Elle ne donna pas suite « *la société Pickett, firme importante, spécialisée surtout dans la destruction des munitions, ne semblait guère pouvoir s'intéresser à un marché ayant des apparences aussi modestes*[1481] ».

F.N. Pickett & Fils releva finalement le défi de la neutralisation et la valorisation des matériaux de près de 400 000 tonnes de munitions de la Grande Guerre, démarrant avec la *C-Factory* de Trélon en 1920, et achevant son aventure industrielle en France et en Belgique avec la « Place à gaz » à proximité de la ferme de La Gélinerie, en Meuse, vers 1926, un site jusqu'alors peu connu sur ce plan historique mais largement médiatisé car cristallisant sur lui toute la question de la séquelle de la Grande Guerre sur notre environnement.

L'exécution des contrats fut placée sous le contrôle du *Disposal Board* tandis que le contrôle technique des opérations resta en France dans les prérogatives (i) des services de l'Artillerie, (avec l'appui d'experts comme le Général Lepelletier, Inspecteur des Munitions) et (ii) en Belgique d'un représentant du gouvernement et des officiels de la Commission Centrale de la Récupération (CCR), en la personne du Lieutenant-Général Tollen.

[1478] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7012. Bourbourg Progress –Contd.

[1479] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple. Marché de démolition des munitions du Camp de Chalons. Exposé de la question et propositions du chef de section. 15 avril 1921.

[1480] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple. F.N. Pickett & Fils, Démonteurs de munitions toxiques et explosifs à Monsieur le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions, Paris. Wimereux, le 22 mars 1921. Signé : Martin. Secrétaire.

[1481] Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Année 1930. 1re Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930*, op. cit*. p. 18.

4.3.2 Inventaire des usines et chantiers de F.N. Pickett & Fils

Le Tableau 29 dresse l'inventaire de tous les sites exploités par l'entreprise F.N. Pickett & Fils qui sont, pour la majorité d'entre eux, positionnés sur la carte de la Figure 213.

Désignation	Localisation	Nature du contrat	Type d'engins démolis	Dates d'exploitation	Tonnages / quantités démolies
A-Factory	Les Attaques (Pas-de-Calais)	Contrat des « cylindres à gaz »	Cylindres à gaz et projectiles *Livens*	Inconnue	100 000 unités certainement déplacées sur Dannes.
B-Factory	Westroozebeke (Flandre occidentale, Belgique)	Deux contrats belges de désobusage	Engins chimiques et explosifs	1920 - 1925	32 420 tonnes (livrées à Pickett par les Belges).
C-Factory	Trélon et Liessies (Nord)	Contrat français	Engins chimiques et explosifs	1920 - 1925	Au moins 2 millions de projectiles ex-allemands (et munitions chimiques issues de la récupération dans le Pas-de- Calais).
D-Factory	Dannes Camier (Pas-de-Calais)	Contrat britannique des munitions	Projectiles chimiques et explosifs et munitions de petits calibres	1920 - 1925	110 000 tonnes dont 80 000 tonnes de projectiles explosifs avec une bonne proportion d'obus *Shrapnel* et de grenades, et 30 millions de projectiles de petit calibre.
E-Factory	Audruicq (Pas-de-Calais)	Contrat britannique des munitions	Obus explosifs essentiellement d'artillerie lourde, comprenant une grande proportion d'engins de marine de 14 pouces	1920 - 1924	50 000 tonnes.
F-Factory	Moliens, à proximité d'Abancourt (Oise). aussi désigné par « Blargies »	Contrat britannique des munitions	Obus explosifs de tout calibre dont des 15-inch pour obusier *Howitzer,* et de grandes quantité de projectiles de petit calibre.	1920 - 1924	55 000 tonnes.
G-Factory	Fressenenville (Somme)	Contrat britannique des munitions	Projectiles pour tirs rapides. Grenades	1920 - 1921	17 000 tonnes.
H-Factory	Saigneville (Somme)	Contrat britannique des munitions	Engins chimiques et explosifs, grenades et explosifs	1920 - 1924	Plusieurs millions d'obus *Shrapnel*, plus d'un million de grenades à main, nombreuses bombes d'aviation, 400 tonnes d'explosifs.
J-Factory	Zeneghem (Pas-de-Calais)	Contrat britannique des munitions	Projectiles explosifs allant d'obus de 18 *pounder Howitzer* au calibre 15 pouces de *Howitzer*.	1920 - 1924	25 000 tonnes.
K-Factory	Rouxménil (Seine-Maritime)	Contrat britannique des munitions	Inconnu.	1920 - ?	Inconnus.

Désignation	Localisation	Nature du contrat	Type d'engins démolis	Dates d'exploitation	Tonnages / quantités démolies
M-Factory	Bourbourg (Nord)	Autre contrat britannique	Inconnue.	1922 - 1923	35 200 tonnes
Conteville	Conteville et Domléger (Somme)	Autre contrat britannique	Munitions allemandes	1922 - 1923	10 100 tonnes
Sissonne	Sissonne (Aisne)	Autre contrat français de munitions	Inconnue.	1925 - 1926	Inconnus.
Saint-Erme	Saint-Erme (Aisne)		Inconnue.	1921	Inconnus.
Vitterli	Brest (Finistère)	Small-Arms	Munitions de petit calibre.	1922 - 1926	Inconnus.
Coulogne	Coulogne (Pas-de-Calais)	Inconnu.	Inconnue.	1921	Inconnus.
Mérignoles	Mérignoles (Somme)	Inconnu.	Inconnue.	1926	Inconnus.
Bray-Dunes	Bray-Dunes (Nord)	Inconnu.	Inconnue.	1923 - 1924	Inconnus.
La Gélinerie « Place à gaz »	Azannes-et-Soumazannes (Meuse)	Autre contrat (militaire) français de munitions.	Munitions chimiques ex-allemandes, en particulier des obus à « Croix bleue »	1926 - 1928	200 000 engins (détruits par brûlage).

Tableau 29 : Listing des usines, terrains de destruction et dépôts exploités par F.N. Pickett & Fils[1482].

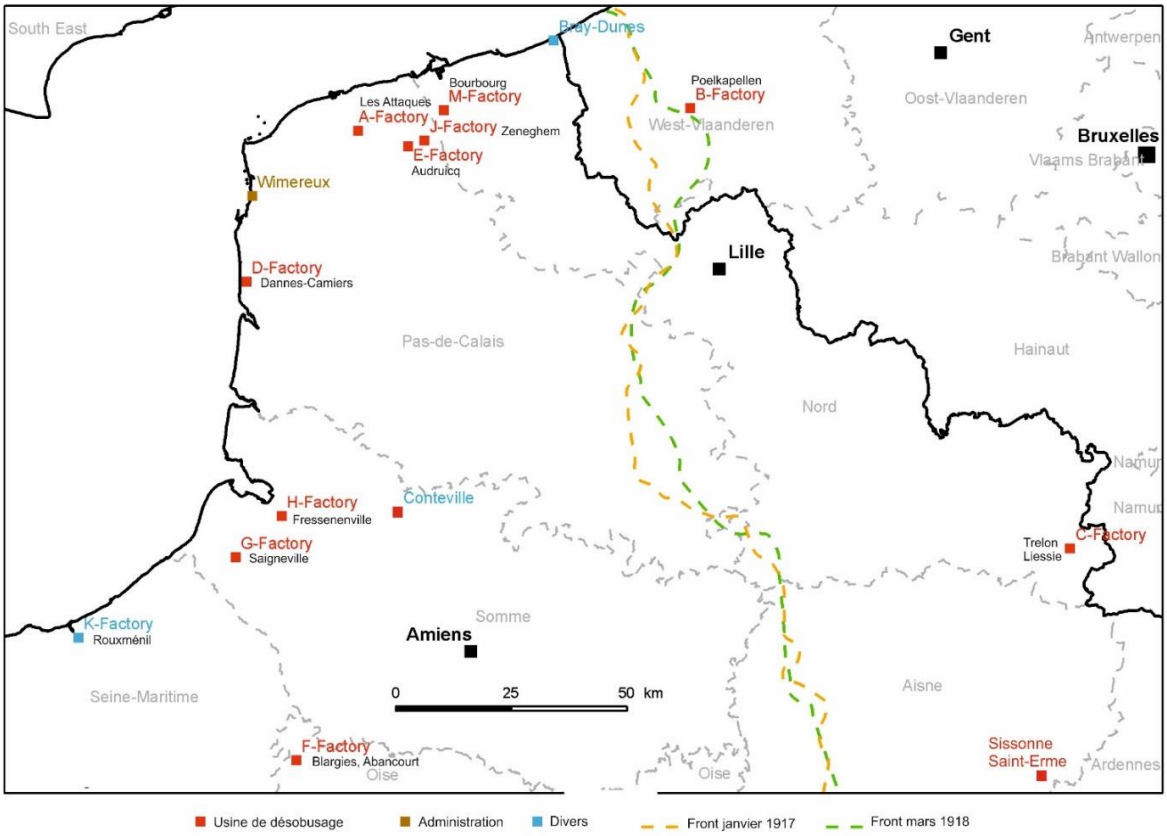


Figure 213 : Les usines et implantations de l'entreprise F.N. Pickett & Fils[1483].

Entre 1920 et 1925, F.N. Pickett & Fils exploita 19 usines spécialisées en France et compta dans ses effectifs près de 4 000 personnes.

[1482] D'après Bausinger, T., non publié, modifié. Communication personnelle.

[1483] *Ibid.*

4.3.3 Périodes et durées d'exploitation

Le Tableau 30 suivant compile l'ensemble des chantiers F.N. Pickett & Fils et les dates durant lesquelles ils étaient explicitement affichés en exploitation (ou clôturé) sur les papiers à entête de l'entreprise, conservés aux archives nationales de Londres sous la cote MUN04 / 7011. L'essentiel de l'activité de F.N. Pickett se concentra entre 1920 et 1924. Les exploitations les plus longues semblent avoir été celles de (i) la *D-Factory* à Dannes Camiers (compte tenu des tonnages considérables à démolir (110 000 tonnes) et de difficultés techniques et sécuritaires, (ii) la *C-Factory* à Trélon et Liessies, (iii) la *B-Factory* à Westroozebeke, ces deux derniers sites présentant la particularité d'avoir démoli des munitions ex-allemandes, parmi lesquelles des munitions chimiques (présentant des difficultés de déchargement). Les chantiers de Sissonne dans l'Aisne et de la Gélinerie / Place à gaz en Meuse, figurent parmi les plus tardifs de l'entreprise. L'essentiel de l'activité de Pickett se concentra en France et en Belgique sur la période 1920-1923.

Date du papier à en-tête	Westroozebeke (Belgique) *B-Factory*	Coulogne (Pas-de-Calais)	Trélon - Liessies (Nord): *C-Factory*	Dannes Camiers (Pas-de-Calais): *D-Factory*	Audruicq (Pas-de-Calais) *E-Factory*	Moliens Abancourt (Oise) *F-Factory*	Fressenneville (Somme) *H-Factory*	Saigneville Somme) G-Factory	Zeneghem, Bourbourg (Nord) *M-Factory*	Rouxmesnil (Seine-Maritime) *K-Factory*	Saint Erme (Aisne)	Bray-Dunes (Pas-de-Calais)	Sissonne. (Aisne)	Brest (Finistère)	Merignole (Somme)	La Gélinerie. "Place à Gaz" (Meuse)
19/03/1921	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■					
11/10/1923	■		■	■	■	■		■	■			■				
20/10/1923	■		■	■	■	■		■	■			■				
13/11/1923	■		■	■	■	■		■	■			■				
08/01/1924	■		■	■	■	■		■	■			■				
08/01/1924	■		■	■												
20/02/1924	■		■	■												
13/03/1924	■		■	■												
13/03/1924	■		■	■												
16/06/1924	■		■	■												
08/08/1924	■		■	■												
02/09/1924	■		■	■												
04/11/1924	■		■	■												
17/11/1924	■		■	■												
23/01/1925	■		■	■												
16/06/1925				■									■			
26/06/1925				■									■			
29/08/1925	■		■	■									■			
16/10/1925			■	■									■			
20/11/1925				■									■			
20/07/1926													■			
22/12/1926																■

Tableau 30 : Périodes d'exploitation des différents chantiers et usines F.N. Pickett & Fils.

4.4. L'USINE *B-FACTORY* DE F.N. PICKETT & FILS DE WESTROOZEBEKE,

4.4.1 L'érection d'une usine de désobusage en plein No Man's Land

En 1920, Pickett se rapprocha des autorités belges afin de pouvoir démolir et neutraliser toutes les munitions accumulées et disséminées sur les anciens champs de bataille de Flandre occidentale, qu'elles soient britanniques, allemandes ou encore françaises. L'usine *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils fut installée dans un des secteurs de l'ancien front occidental le plus désolé de par l'intensité des destructions, dans le Bois de Houthulst entièrement déchiqueté, a environ 12 kilomètres au nord-est d'Ypres, sur le territoire de la commune de Poelkapelle (même si les documents officiels employaient le nom de la commune voisine Westroozebeke pour désigner cette usine). Pickett s'implanta en plein *no man's land* car le sol y avait été jugé trop pauvre pour la remise en culture[1484]. Une remise en état des sols était donc nécessaire préalablement à l'érection de l'usine, notamment pour construire les pistes et route permettant aux autorités belges d'y acheminer les projectiles. Il s'agissait aussi d'y acheminer de l'eau industrielle pour les procédés et de l'eau de qualité potable pour les besoins des personnels. Cette implantation en plein *no man's land* du chantier de désobusage constitue une particularité qui distingue la *B-Factory* des autres chantiers de neutralisation d'engins et de surplus de guerre. Ces particularités méritent qu'un développement histotrique soit accordé à ce site, au dela de ses pollutions évidentes.

4.4.2 Livraison des munitions et contractualisation avec le Service de Destruction des Munitions

Les archives montrent que le Service de Destruction des Munitions (SDM) livra des munitions chimiques à l'usine Pickett de Westroozebeke jusqu'à au moins 1920. Les engins qui ne pouvaient être acheminés en Flandre occidentale furent dirigés par le SDM sur le dépôt de Morhet (approximativement à 6 km au sud-ouest de Bastogne, dans la partie sud-est de la province du Luxembourg[1485]). Le 24 avril 1921, F.N. Pickett signa avec les autorités belges un contrat (dit « contrat belge ») pour l'élimination de munitions de tous calibres, leurs constituants et les appareils de protection respiratoire utilisés dans les tranchées durant la guerre[1486]. L'Article 17 du contrat d'avril 1921 stipulait qu'il se substituait un contrat plus ancien en date du 31 mai 1920. L'Article 1 du contrat stipulait que l'Etat belge devait livrer au moins 1 000 tonnes de munitions par mois pour un total de 15 000 à 16 000 tonnes en 10 mois, les 15 000 premières tonnes étaient destinées à indemniser Pickett pour la construction d'une voie ferrée vers le terrain où les munitions devaient être entreposées. La firme était tenue de payer 13,5 francs par tonne (emballage et conditionnant exclus) de munitions résiduelles non démolies (Article 3). Les matériaux générés par le démontage des projectiles devinrent propriété de la compagnie, mais l'expédition à l'étranger (en Grande-Bretagne) était soumise aux licences et règlementations pour l'exportation (Articles 3 et 13). Le contrat prévoyait aussi la présence permanente sur site d'un représentant du gouvernement belge et devait rester en tout temps libre accès aux officiels de la CCR. Des clauses contractuelles visaient aussi des mesures et précautions détaillées en matière de sécurité.

[1484] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, *op. cit*, p.62.

[1485] Craenen (note 13). p. 5.

[1486] Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Centre de Documentation Historique, Evere. Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit*, p. 203.

4.4.3 Méthodes et moyens de déchargement des munitions chimiques et explosives à la *B-Factory*

Brûlage des projectiles en tranchées

Les modalités d'exploitation de cette usine restent à ce stade des recherches historiques obscures. Les rares archives disponibles montrent qu'au sein de la *B-Factory*, la majorité des obus explosifs ex-allemands, français ou britanniques, furent déchargés par brûlage à l'air libre (*Open Burning*), plutôt que par fusion à l'eau chaude « *The specially distinctive feature about the operations in this Westroozebeke factory is the fact that the majority of the high exposive shells which are treated here are emplied by the process of burning out instead of washingout*[1487] ». Le choix du déchargement par brûlage fut imposé par la nature des explosifs ex-allemands de la fin de la guerre, impurs, formés de mélanges complexes (cf. Section 1h du présent manuscrit), qui ne se dissolvaient pas aisément au contact de l'eau chaude mais généraient de surcroit des boues.

L'Article 10 du contrat « belge » encadra la question bien spécifique de la démolition des engins chimiques, en insistant sur les mesures de sécurité à respecter (ventilation des lieux de travail, équipements de protection, procédures d'évacuation d'urgence, etc.). Les méthodes de destruction des engins chimiques autorisées par le contrat étaient énumérées comme suit : « *Le liquide, corrosif et les composés toxiques doivent être détruits sur site, retirés, transformés en produits inoffensifs, ou éliminés dans un forage d'une profondeur de 2,50 mètres après avoir été neutralisés. Les trous seront comblés et fermés par la compagnie Pickett à ses frais, à l'entière satisfaction des autorités belges*[1488]. La manière dont procéda Pickett pour démolir les engins chimiques n'est pas très claire. Le vidage en puits perdu décrit dans ce qui précède était une méthode d'élimination des toxiques de guerre liquide explicitement indiquée dans les contrats des éliminateurs d'engins de guerre, en France, comme en Belgique.

L'aire de brûlage exploitée par Pickett à Poelkapelle a été localisée sur le terrain dans le cadre de cette recherche. Les observations sur le terrain de très nombreuses fioles d'arsine issues d'obus de 77 mm courts et longs, vidées, pour certaines totalement ou partiellement fondues, associées à des fragments charbonneux, ne laissent planer aucun doute quant à la nature d'une partie des projectiles neutralisés sur ce *Burning Ground* : Pickett y détruisit par brûlage (comme il le fit sur ses chantiers de Trélon et de la « Place à gaz ») les obus allemands à *Croix bleue* chargées d'arsines. Les photographies de la Figure 214 et de la Figure 215 montrent la préparation d'opération de brûlage sur le *Burning Ground* de la *B-Factory*. La neutralisation de ce type de projectiles posa des difficultés techniques durant la phase de démarrage de l'usine jusqu'en février 1922, date à laquelle de lieutenant-général Tollen (président de la CCR), demanda à Pickett de pouvoir visiter ses installations spéciales de son usine de Dannes Camiers en France, « *pour éviter tout mauvais calculs* ». Les méthodes de destruction étaient soumises à l'appréciation de la présidence de la CCR « *Le démontage des munitions à gaz sera effectué en suivant les méthodes approuvées par le Président de la CCR*[1489] ».

[1487] *Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Centre de Documentation Historique, Evere. Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997). The destruction of old chemical munitions in Belgium, op. cit*

[1488] Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, op. cit. p. 203.

[1489] *Ibid.*

Figure 214 : Préparation d'une opération de brûlage d'obus de gros calibre ouvert au culot et de projectiles d'artillerie de campagne en rangées, sur la droite. Usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils de Poelkapellen (Westroozebeke). A l'arrière-plan, les restes et chandelles de la forêt de Houlthust. Belgique. Non daté (vers 1921)[1490].

Figure 215 : Préparation de trois tranchées de brûlage d'obus de gros calibre ouverts au culot. A noter le bois disposé au centre des tranchées. Usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils de Poelkapellen (Westroozebeke). Belgique. Non daté (vers 1921)[1491].

[1490] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, *op. cit.* p.64.

[1491] *Ibid.*

Une lettre du lieutenant-general Tollen, au Ministre belge de la Défense datée du 23 février 1922[1492] fournit la preuve que les installations qui traitaient initialement les engins allemands à *Croix verte* (phosgène) et à *Croix jaune* (*Ypérite*) donnaient totale satisfaction. Toutefois, un rapport du 15 septembre 1922 précisait que ces neutralisations avaient été réalisées par tâtonnements, suivant une progression par « essais et erreurs ».

Destruction des toxiques de guerre déchargés

Les principales difficultés, justifiant l'allongement des délais contractuels de démolition concernaient la neutralisation du phosgène et de l'*Ypérite*, qui ne fut opérée qu'en fin d'exploitation de l'usine[1493].

Le seul document d'archive, révélé par Zanders[1494], qui décrit les méthodes de F.N. Pickett & Fils à Poelkapelle est le rapport de la délégations belge qui montre que les agents toxiques de guerre avaient été éliminés plutôt par brûlage dans des fours spécialement conçus plutôt qu'avoir été neutralisés et infiltrés dans des puits.

Ce type de four était capable de traiter tous les types d'agents toxiques, liquides comme gazeux, moyennant quelques ajustements techniques des installations. La description de ce four est donnée en Section 11h du présent manuscrit[1495]. Ces fours étaient dotés de dispositifs de contre-lavage des gaz à l'eau. La description de ce four se rapprocherait de celui des dispositifs qui avaient été retenus par Clere & Schwander dans ses ateliers de destruction de munitions chimiques du canton de Spincourt en Meuse. Le personnel en charge de faire fonctionner le four était doté de vêtement et de masques de protection, et celui, évoluant dans l'environnement de cette installation était sommé de garder un masque à gaz sur soi en permanence, prêt à l'usage, le risque d'engins fuyards (parmi les 30 à 40 projectiles à vider dans une passe par four) ne pouvant pas être écarté.

4.4.4 Avancement des opérations de neutralisation des munitions

En septembre 1922, le lieutenant-général Tollen écrivit un imposant rapport concernant l'avancement des opérations de F.N. Pickett & Fils à la *B-Factory* [1496]. Tollen nota que l'industriel améliora notablement ses rendements de destruction, passant d'une moyenne mensuelle de 189,5 tonnes sous le premier contrat à 1 686 tonnes sous le second contrat. Dans les faits, ce rendement mensuel variant considérablement selon les conditions climatiques saisonnières, et certaines difficultés techniques rencontrées pour la démolition de certains types d'engins.

[1492] Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit.* p. 203.

[1493] Centre de Documentation Historique, Evere. Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, au Ministre de la Défense Nationale, Bruxelles, 15 septembre 1922, document no. 52705/A/2950, Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit*. p. 203.

[1494] Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit.*

[1495] Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Institut d'Hygiène de Biologie et Chimie de l'Armée. Document no. C/28, Bruxelles, 3 mars 1922. Rapport par Paul Erculisse, Pharmacien de 1re Classe, Chef du Laboratoire de Chimie Toxicologique, Dr Sillevants, Médecin de Régiment, Chef du Laboratoire de Physiologie Toxicologique et le Capitaine-Commandant Van den Berghe. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit.* p. 204.

[1496] Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, au Ministre de la Défense Nationale (note 29).

Le tonnage n'était donc pas un indicateur fiable du degré d'activité et du volume de travail au sein de ces usines. Les tonnages chutaient aussi lorsqu'il fallut démolir de petites munitions comme les grenades.

Au 1er septembre 1922, Pickett réceptionna 7 400 tonnes de munitions chimiques livrées par les autorités belges (environ 23% de la totalité des munitions qui lui furent livrées) et avait détruit 510 tonnes de munitions à *Croix jaune*, 4 350 tonnes d'obus à *Croix bleue* et 2 000 projectiles d'artillerie de tranchée de 76 mm (*leichte Minen*) à *Croix verte*. Le SDM avait à ce moment-là en stock 2 300 tonnes de munitions qui s'ajoutaient aux 2 500 tonnes en attente de démolition à l'usine Pickett (sur les 4 800 tonnes, les ¾ étaient des engins à *Croix verte* et ¼ à *Croix jaune*). Tollen précisa aussi que Pickett projetait la construction d'un second four, identique au premier, sous la condition que le délai contractuel des démolitions soit prolongé de sept mois (jusqu'à mars 1923).

Un courrier de Pickett au lieutenant-général Tollen daté du 14 septembre 1922 laissa sous entendre que les travaux de démolition auraient été achevés plus tôt, après quoi Pickett désira fermer son usine[1497]. Cette usine employa jusqu'à 300 personnes. Un total de 32 430 tonnes de munitions furent livrées dont 86% furent dénaturées par F.N. Pickett & Fils (cf. Tableau 31)

	Livraisons à FN Pickett & Fils (tonnes)	Démolies par FN Pickett & Fils (tonnes)	Pourcentage démoli (%)
Premier contrat (31 mai 1920-21 avril 1921)	10 200	1 800	17,64
Second contrat (21 avril 1921-1er septembre 1922)	22 230	26 130 (comprenant des munitions non détruites dans le cadre du premier contrat)	117,54
Total	**32 430**	**27 930**	86, 12 (pourcentage détruit pour la totalité des munitions livrées)

Tableau 31 : Tonnage de munitions livré et démoli et taux de démolition de F.N. Pickett & Fils dans l'usine *B-Factory* de Westroozebeke[1498].

4.4.5 Conclusion

Le camp de Westroozebeke ferma définitivement en 1924[1499]. Les troupes belges et britanniques procédèrent alors au coulage en Mer du Nord, au large des côtes belges, des munitions chimiques résiduelles. La *B-Factory* de Westroozebeke présentait, au regard des archives consultées, deux particularités eu égard aux autres usines Pickett et autres chantiers de désobusage (i) elle fut érigée en plein *No Man's Land* impliquant au préalable la remise en état des sols et la construction de voies de communication sur des terrains dévastés, (ii) les déchargements des engins furent avant tout opérés par le brûlage à l'air libre et en tranchée. Enfin, contrairement au site de la *C-Factory* de Trélon Liessies, aucune difficulté particulière d'ordre administratif et réglementaire ne transparaît au travers des archives, qui ne font par ailleurs aucune mention d'accidents ou de nuisances occasionnés par ces activités de désobusage.

[1497] Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Lettre de Pickett metal au Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, Londres, 14 septembre 1922. In Zanders, J. P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit*. p. 206.

[1498] *Ibid*, p. 205.

[1499] Craenen (note 13). p. 14. *In Zanders, J. P. The destruction of old chemical munitions in Belgium, p. 206.*

L'emplacement du terrain de brûlage est actuellement en partie occupé par des champs pour la culture du maïs, de la pomme de terre (cf. Section 4e du présent manuscrit) et en partie par les installations militaires du Camp de Houthulst où l'Armée belge (SEDEE, Service d'Enlèvement et de Destruction d'Engins Explosifs, déminage) procède encore aujourd'hui à la destruction de munitions conventionnelles et explosives par pétardement et de munitions chimiques dans des installations modernes (chambres de détonation et fours).

4.5. VERS UNE PORTE DE SORTIE DE L'AVENTURE INDUSTRIELLE DE F.N. PICKETT & FILS EN FRANCE. LA CLAIRIERE NOIRE DE LA FORET DE SPINCOURT, EN MEUSE (1926 – 1927).

Fin 1923, les activités de désobusage de l'entreprise Clere & Schwander dans le canton de Spincourt commencèrent à décliner et avec elles les quantités de munitions anciennes à aliéner, mais persistait encore dans la région le dépôt de rassemblement des munitions chimiques de la Meuse et de Meurthe-et-Moselle dont la constitution fut ordonnée par le Général Commandant l'Artillerie de la 6e Région militaire, le général Régnier, en mars 1919 à proximité de la ferme de la Gélinerie, puis transféré plus à l'est dans le Bois du Blanc Estoc. En octobre 1923, selon la presse locale, des destructions y auraient été opérées par pétardement (dont les traces seraient encore visibles entre les fermes de la Gélinerie et celle, plus au sud, des Warières. « *Spincourt — L'usine à munitions. — La société Schwander [sic] qui a entrepris le désobusage des milliers d'obus boches, qui se trouvaient dans un vaste dépôt entre Mouzay [sic] [ndlr : Muzeray] et Spincourt, a terminé ses travaux d'ici la fin de l'année. […]. Il reste encore un dépôt de ces obus toxiques, près de la ferme de la Gélinerie (Azannes), mais on les fait sauter à raison de deux à trois mille par jour*[1500] ».

La Direction du Service de l'Artillerie de la 6e Région militaire s'adressa par courrier le 8 décembre 1923 à Monsieur le Préfet de la Meuse au sujet « *dépôt de munitions toxiques, allemandes provenant de la récupération sur les anciens champs de bataille* » dans la perspective de sa destruction par des industriels. Mais les éventuels industriels intéressés et l'autorité militaire se heurtèrent aux réticences des populations à l'installation de nouveaux chantiers de désobusage « *La cession de ces munitions a déjà été envisagée et il résulte des reconnaissances études effectuées à ce sujet par les industriels intéressés, qu'il sera très difficile à l'adjudicataire de se procurer les terrains qui lui seront nécessaires pour l'installation de ces chantiers, car les propriétaires de cette région refusent, en général, de louer leur terrain* [1501]». La Société Anonyme d'Exploitation de munitions (Clere & Schwander) figurait parmi les adjudicataires éventuels des munitions stockées à la Gélinerie. La Direction de l'Artillerie exprima clairement auprès du Préfet sa préférence pour cette entreprise, dans l'intérêt général, car disposant déjà dans la région des installations, personnels et compétences pour démolir les munitions de La Gélinerie dans les meilleurs délais.

Mais en 1925, ce fut le nom d'une autre entreprise qui s'afficha dans la presse locale comme opératrice de démolition de munitions à la Gélinerie « *Grémilly. — Asphyxie par les gaz. — L'ouvrier Retours Eugène, 32 ans, travaillait sur les chantiers de la Société Alsacienne de Munitions, au vidage d'obus de 150 à double croix verte, contenant du phosgène, près de la ferme de la Gélinerie. […] Retours succombait et a été enterré à Grémilly* […][1502]».

[1500] Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 20 octobre 1923.

[1501] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Désobusage — Champs d'explosions de Vaudoncourt – Spincourt - Muzeray — Dépôt de la Gélinerie.

[1502] Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 17 janvier 1925.

La Société Alsacienne de Produits Métallurgiques (SAPM) était bien connue par le Ministère de la Guerre et le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks comme un sous-traitant de la Société Lorraine de Produits Industriels (SPLI), titulaire en 1920 d'une part d'un marché de démolition des munitions du territoire de Lorraine (actuel département de la Moselle) et d'autre part du camp de Châlons.

L'entreprise fut déclarée en faillite le 30 janvier 1922. L'exercice de la SAPM s'avéra possiblement éphémère puisqu'en juillet 1925, le dépôt de munitions de Spincourt ayant été éliminé (Clere & Schwander liquidant au même moment son matériel par des ventes aux enchères), celui de La Gélinerie aurait été délaissé par l'industriel obligeant l'autorité militaire à le garder « *Azannes. — […]. — Les Allemands avaient installé dans les forêts de Mangiennes et de Billy des dépôts de munitions qui comprenaient des centaines de milliers d'obus. À l'armistice, il en reste encore des quantités. L'usine de munitions établie à* Spincourt *en désobusa un certain nombre ; une autre usine établie à la Gélinerie du fermer ses portes, laissant à cette ferme un nombre considérable d'obus et d'explosifs. Des vols de cuivre et de Cheddite y furent commis. L'autorité militaire se décida alors à y établir un poste de garde […]* [1503]».

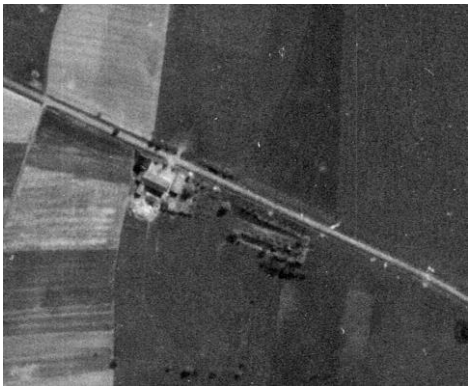
Selon Forget (1928) *« Rappelons que, dans la série domaniale de Grémilly, près de la ferme de* La Gélinerie*, a été constitué, en 1920, un dépôt considérable de plus de 200.000 obus allemands à gaz toxiques, de tous calibres, dont la désamorçage et la destruction, non encore terminés, sont assurés sur place par un concessionnaire du Ministère de la Guerre*[1504] *».* Quel était cet industriel ? La lettre du Directeur de l'Enregistrement des Domaines et du Timbre à Monsieur le Conservateur des Eaux & Forêts, Bar-le-Duc, en date du 10 avril 1930, précise « *Aux termes d'un arrêté préfectoral du 29 septembre 1926, la firme Pickett et Fils, de Londres, représentée par son mandataire, M. le Capitaine Cecil Darragh à Boulogne-sur-Mer, a été autorisé à occuper une surface de terrain de 1 hectare 86 dans la forêt domaniale de Spincourt, en vue de la destruction d'obus appartenant au Service de l'Artillerie. En outre, par une décision préfectorale du 30 décembre 1926, ladite firme a été autorisée à exploiter une surface de 3 hectare 86 de taillis* ». L'autorisation d'exploiter fut attribuée à F.N. Pickett [1505] & Fils le 29 septembre 1926, avec indemnisation (1 807 Frs) en compensation des dégâts forestiers occasionnés. Dès début septembre 1926, F.N. Pickett & Fils chercha par voie de presse et publicité à recruter du personnel compétent pour son « usine » de la Gélinerie « *On demande bons manœuvres pour désobusage, salaire minimum : trois francs de l'heure. S'adresser Usine Pickett, la Gélinerie, par Damvillers (Meuse)*[1506] ».

[1503] Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 18 juillet 1925.

[1504] Forget, J. (1928). *La reconstitution forestière de la zone rouge dans la Meuse. Bulletin de la Société des Lettres, Sciences et Arts de Bar-le-Duc et du Musée de Géographie*: 121-131.

[1505] Francis Norman Pickett.

[1506] Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain*, 12 Septembre 1926 et *L'Est Républicain*, 10 novembre 1926



En décembre 1926, le site de La Gélinerie était déclaré comme (le seul) « *site en exploitation* » sur le papier à entête de la maison F.N. Pickett & Fils conservé aux archives nationales à Londres[1507].

Pickett fut autorisé à s'installer en forêt pour démolir les obus appartenant au Service de l'Artillerie parmi lesquels, si on considère les engins qui avaient été rassemblés au dépôt proche voisin du Bois du Blanc d'Estoc, une majorité de projectiles chimiques ex-allemands.

Figure 216 : Structure en « U » merlonnée à proximité du corps de ferme de la Gélinerie[1508].

Le cliché aérien le plus ancien couvrant le secteur de la Gélinerie montre l'existence à l'est du corps de ferme d'une imposante structure merlonnée en fer-à-cheval. Il n'est pas exclu qu'il s'agisse des vestiges des anciennes installations de démontage des obus. A l'été 1927, il semblerait que Pickett ait achevé ses opérations industrielles à la Gélinerie. La presse locale fit en effet à compter d'août 1927 publicité de ventes aux enchères d'un important matériel industriel comprenant voies ferrées, wagonnets, machines-outils et outillage varié, baraquements (cf. Tableau 32). Pickett liquida donc aux enchères le matériel dont il n'avait plus aucune utilité en quittant son chantier meusien.

[1507] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7011. F.N. Pickett et Fils. Boulogne-sur-Mer, 22nd December 1926. Col. H.C. Cole, Chief Land Agent & Valuer. War Office. Room 470. London. Signé : Darragh, General Manager.

[1508] Extrait ddu cliché IGNF_PVA_1-0__1948-04-21__C3639-0361_1948_MISSIONTHIONVILLE5_0048.

L'Est Républicain, 14 Août 1927	L'Est Républicain, 11 Septembre 1927
Étude de Me Camille Saint-Antoine, huissier à Spincourt (Meuse). **Vente. D'un important outillage, matériel d'usine et mobilier. Au dépôt de La Gélinerie, commune de Grémilly (Meuse). Le jeudi 18 août 1927, à 1 heure de l'après-midi.** Requête de la Société Pickett et Fils. **DÉSIGNATION :**	Étude de Me Camile Saint-Antoine, huissier à Spincourt (Meuse). **Vente de matériel d'une usine et mobilier au Dépôt de La Gélinerie, près Billy-la-Mangienne le mercredi14 septembre 1927, à neuf heures.** **DÉSIGNATION :**
wagonnets pour voie de 0 m 60, perceuses diverses, meule émeri, perceuses portatives électriques 220 Volts, moteurs électriques, force 2 CV, forge de campagne enclumes, marteaux ; bascule décimale, réservoir tôle galvanisée, poutrelles fer, tuyaux d'eau fer, briques réfractaires, 6 téléphones de campagne, 5 chronomètres de pointage pour gardiens, 1 tonneau en tôle, brancards. 1 baraquement panneaux démontables, 1 autre baraquement planches, 5 hangars couverts tôles, madriers, traverses, 1coffre-fort, tables deux bureaux, fauteuils, casiers, classeurs, 3 lits en bois, 60 lits en fer, matelas, 100 couvertures deux couchages, armoires, table de toilette, tables de nuit, 5 cuisinières, 10 fourneaux d'appartement, 10 fourneaux lessive, tables diverses, baignoires, lampes, bidons, baquets, vaisselle diverse, etc.	9 armoires, 16 chaises, 7 tables, 40 couvertures, fourneaux divers, 1 baignoire. 1 machine à écrire Royal. 6 baraquements, 2 hangars, 105 bidons d'essence (vides). 1 camion 5 tonnes, 1 remorque 4 roues bandages neufs. 1 locotracteur Renault 10 CV, 1 motopompe, 8 perceuses. 72 tonnes de voie de 0,60 avec aiguilles, 5 wagonnets plats. Groupe électrogène, arbres de transmission, tours complets. 1 moteur électrique 10 CV, 2 forges, étaux divers, filières neuves, etc. Détail aux affiches.

Tableau 32 : Extraits des annonces publicitaires de L'Est Républicain du 14 Août 1927 et du 11 Septembre 1927[1509].

Un document conservé aux Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF) précise la période durant laquelle le marché de démolition de munitions de F.N. Pickett & Fils dans la 6e Région militaire était en vigueur et apporte des éléments d'information permettant de connaître les ordres de grandeur des tonnages démolis en exécution de ce contrat « *Le marché de démolition de munitions passé avec M.M. Pickett & Fils le 15 juillet 1926 a été réglé définitivement le 29 septembre 1927, les sommes payées par le Parc d'Artillerie à l'entrepreneur au titre de ce marché s'élèvent à la somme de 490 729 f 37 correspondant à 8 692 tonnes 314, à 182 f 00 la tonne*[1510]».

Pickett était donc bel et bien sous contrat régulier avec l'Etat et a bénéficié des recettes émanant de la vente des métaux de récupération en toute légalité. Le contrat liant Pickett à l'Etat français pour la démolition du stock de La Gélinerie n'a pas été retrouvé dans les fonds d'archive consultés.

[1509] Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain* du 14 Août 1927. *L'Est Républicain* du 11 Septembre 1927.

[1510] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), cote 4317-1, B 30035. Le Lieutenant-Colonel, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Chef du Service d'Apurement des comptes spéciaux du Trésor (Liquidation des stocks français). Metz, le 26 mars 1928. Signé illisible.

La dernière trace relatant les activités de désobusage de F.N. Pickett & Fils à la Gélinerie est un courrier du Chef d'Escadron Cottel, Commandant le PAR de Metz à Monsieur le Ministre des Finances (Service d'apurement des comptes spéciaux du Trésor, Liquidation des stocks français) daté du 13 mars 1928, précisant que « *suivant le contrat passé avec M.M. Pickett & Fils, 5, rue Besses des Tintelleries à Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais) les éléments provenant de la démolition des munitions au dépôt de La Gélinerie restent la propriété de l'adjudicataire (Article VIII du cahier des charges). Aucun ordre de reversement n'a été établi*[1511] ». D'après les archives disponibles, la « *Place à gaz* » semble avoir été le dernier site exploité par F.N. Pickett & Fils sur le territoire français.

4.5.1 Conclusion

L'entreprise F.N. Pickett & Fils fut rendue adjudicataire le 15 juillet 1926 d'un marché de démolition de munitions chimiques ex-allemandes de la 6e Région militaire, rassemblées, accumulées, puis entreposées dès 1919 à la lisière de la forêt de Spincourt, dans un secteur situé à 20 km au nord-est de Verdun, sur ordre du Général Régnier, Commandant l'Artillerie de cette Région militaire. Ce militaire fut soupçonné d'avoir été complaisant avec Pickett pour l'attribution des marchés. L'affaire fut portée devant le Sénat mais resta sans suites judiciaires. Possiblement débutées fin 1926 ou début 1927 ses opérations se concentrèrent sur 14 mois pour la dénaturation d'environ 8 700 tonnes qui avaient échappé aux démolitions d'un premier exploitant défaillant vers 1920. Pickett exploita un atelier de désamorçage à proximité de la ferme de la Gélinerie ; ces munitions une fois désamorcées étaient acheminées par wagonnets sur voies étroites jusqu'au terrain de brûlage, situé en pleine forêt de Spincourt, situé à au moins 1 000 m de l'atelier (la distance de sécurité couramment admise au sein de la maison Pickett), pour y être déchargées dans des tranchées de brûlage. Les teneurs exceptionnelles en arsenic dans les sols de surface au droit du terrain de brûlage (*Burning Ground*) de la forêt de Spincourt (cf. Section 4e du présent manuscrit) associées à l'occurrence de très nombreuses fioles et tessons de fioles d'arsines caractéristiques des obus à *Croix bleue*, connues depuis le début des années 2000, ne laissent planer aucun doute que F.N. Pickett & Fils y neutralisa de grandes quantités d'obus ex-allemands arséniés à *Croix bleue*, présents à au moins 20% dans les arsenaux chimiques allemands au moment de l'armistice et constituant et de loin les munitions chimiques sorties en plus grand nombre des usines allemandes de production de munitions chimiques en 1918.

Des caractérisations détaillées des résidus de brûlage formant aujourd'hui « le sol » de l'aire de brûlage, une clairière ou rien ne pousse connue sous le nom de « Place à gaz », réalisées dans le cadre de ce doctorat, montrent sans équivoque (cf. Section 4e du présent manuscrit) que le stock de munitions chimiques brûlé par F.N. Pickett & Fils renfermait aussi des projectiles chargés d'*Ypérite* et d'agents lacrymogène bromés (*K-Stoff*). Le contrat Pickett fut administrativement et définitivement clôt le 29 septembre 1927.

Ces éléments historiques, parcellaires, suscitent de nombreuses interrogations.

Quelles furent les motivations ayant amené cette entreprise à intervenir en Meuse loin du territoire (des Hauts-de-France) où elle était historiquement implantée ?

[1511] Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF), cote 4317-1, B 30035. Courrier du Chef d'Escadron Cottel, Commandant le PAR de Metz à Monsieur le Ministre des Finances (Service d'apurement des comptes spéciaux du Trésor, Liquidation des stocks français) du 13 mars 1928.

Pickett avait fait auprès du Ministère de la Guerre ses preuves sur d'autres chantiers entre 1920 et 1925 qu'il maîtrisait la dénaturation des vieilles munitions chimiques ex-allemandes. Pickett était-il venu en Meuse démolir tardivement un stock de munitions chimiques, dont une majorité d'obus ex-allemands à *Croix bleue* qu'un autre concessionnaire opérant à la Gélinerie n'aurait pas été techniquement en mesure de démolir, ou ne s'était pas engagé à le faire car pas assez rémunérateur au regard des difficultés techniques et des risques encourus ?

Existe-t-il un lien entre la présence de Pickett en Forêt de Spincourt et celle, un temps, au sein de cette entreprise du Général Régnier en tant qu'inspecteur contrôleur général, ce haut gradé ayant aussi été à l'origine en 1919 du dépôt de rassemblement des munitions chimiques ex-allemandes en forêt de Spincourt ?

L'origine de la toponymie « Place à gaz » reste à ce jour inconnue. La clairière était ainsi déjà nommée dans les années 40[1512]. Les activités de désobusage visant des munitions chimiques à l'emplacement de l'actuelle clairière étaient donc localement connues. Un lien possible avec le surnom attribué au site de chargement des obus toxiques allemands durant la guerre puis de destruction centralisée des munitions chimiques allemandes de l'entre-deux-guerres de Breloh, « *Gasplatz* » (cf. § 5 de la présente section) semble probable.

4.6. DECHARGER OU COULER LES OBUS CHIMIQUES ? LE COUPERET DU COUTS / BENEFICES

F.N. Pickett & Fils se rapprocha au printemps 1921 des autorités françaises et britanniques afin d'obtenir l'autorisation d'immerger en mer du Nord des engins chimiques.

La demande porta sur approximativement 6 000 tonnes de projectiles à *Ypérite* et 3 000 tonnes de gaines d'éclatement jusqu'alors entreposées dans différentes usines de l'entreprise dans le nord de la France (Coulogne, Dannes, Audruicq, Trélon et Zeneghem, Blargies Moliens, Fressenenville, Saigneville et Conteville ainsi qu'à Sissonne[1513]). Quelques mois plus tard, après l'arrivage de nouveau projectiles livrés par les autorités françaises, le tonnage visé par ces opérations s'élevaient à 12 486 tonnes constituées par 2 153 tonnes d'engins à *Ypérite*, 1 000 tonnes de gaines d'éclatement et 2 333 tonnes d'obus à *Croix jaune* et 7 000 tonnes d'obus à *Croix verte* [1514].

Une commission fut mise en place sous la présidence du Capitaine de vaisseau Cotoni, des représentants des pêcheurs, des Chemins de fer du Nord, des Ponts-et-Chaussées et des autorités britanniques, afin d'examiner la demande et la faisabilité de l'opération d'immersion.

[1512] Communication orale.

[1513] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Boulogne 5 000 tons of shells containing Mustard & Yellow Cross gas. Signed. V. Cotoni, Capitaine de vaisseau, President of the Commission. Boulogne, May 30th 1921.

[1514] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4/6046, Administrator Disposal Board (French Section) to T.W. Morgan, 27 April 1921, and "Translation of Minutes of Proceedings of the Commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to dump in the sea from the Port of Dunkerque gas shells and other ammunition," 1 June 1921.

Ce projet d'abandon définitif et radical des obus chimiques ex-allemands, et avec eux de leurs matières constitutives, initialement réservés dans les différentes usines de désobusage en France, est exposé dans ce qui suit car il est particulièrement éclairant concernant les logiques qui motivaient les choix des méthodes de destruction des REG dans le processus de liquidation des surplus de guerre par les industriels du désobusage à l'issue de la Première Guerre mondiale.

Avant 1920, le désobusage avait vocation à restaurer l'usage agricole des sols de France et de Belgique, à permettre le relèvement des ruines, à relancer les usines et à protéger les populations contre des dangers hérités du temps de guerre. L'opérateur de ce désobusage était l'Etat, qui endossait à la fois le statut de responsable et d'acteur, mais incapable de mettre les moyens pour arriver à ses fins. En 1920 les autorités civiles firent appel à des entités privées pour éradiquer les REG et les surplus de guerre. Cette année-là vit la scission entre les intérêts de l'Etat, donneur d'ordre et contrôleur, et ceux des opérateurs privés sous contrats, le premier cherchant à poursuivre ses objectifs de liquider les surplus pour protéger les populations et libérer les sols de France et de Belgique de ces matériels indésirables, les seconds étaient mus par la recherche du profit.

Pickett, comme d'autres entrepreneurs de la récupération et du désobusage chercha à rebuter uniquement les matériels les plus rémunérateurs, en pilotant ses opérations par la mise en balance des coûts de démolition et des risques encourus pour ce faire d'une part et par les recettes des ventes des produits issus de ces destructions d'autre part. L'équilibre financier de l'entreprise était fragile car totalement dépendant (i) des cours des vieux métaux, (ii) du type et des tonnages de projectiles à dénaturer, et (iii) des progrès technologiques en matière de déchargement d'engins de guerre permettant de réduire les coûts de ces opérations. Les munitions ex-allemandes chargées d'*Ypérite* (*Croix jaune*) ou de phosgène (*Croix verte*) ne répondaient pas début 1921 aux critères des matériels profitables. « *All the ammunition is in the first place defused, and is then ready for « breaking-down », but this is only done if the operation is remunerative. This is not the case with shells filled with « Mustard » and « Green Cross » gases (about 7,000 tons) […]*[1515] ».

F.N. Pickett & Fils n'envisagea donc pas de les décharger, ni même de les détruire par pétardement, ces engins ne détonant pas, vues les faibles quantités d'explosif qu'elles contenaient. La dénaturation des munitions chimiques ne pouvait que s'effectuer à perte, un manque à gagner compensé par la démolition bien plus profitables des engins explosifs « *With poison gas […) it was recognised the 29 000 tons of poison gas could only be dealt with at a loss, but the profits on the explosive ammunition were supposed to cover this*[1516] ». La seule solution techniquement faisable et économiquerment supportable alors envisageable pour se débarrasser de ces surplus était celle de leur abandon (en tant que déchet de guerre) par coulage maritime. « *[…] and it is for this reason that Messrs. Pickett desire to dump them in the sea*[1517] ».

[1515] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Boulogne 5 000 tons of shells containing Mustard & Yellow Cross gas. Signed. V. Cotoni, Capitaine de vaisseau, President of the Commission. Boulogne, May 30th 1921.

[1516] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7006. F. N. Pickett & Son. Report. Upon the financial position & the financial results of Contracts for the breaking down of Ammunition in France and England to 27th September 1922 and later. Price, Waterhouse & Co. London.

[1517] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Boulogne 5 000 tons of shells containing Mustard & Yellow Cross gas, *op, cit.*

Une logique similaire, basée sur une approche coûts / bénéfices, fut suivie par un industriel dans les Alpes à la fin des années 40 pour savoir comment liquider un stock de près de 4 500 tonnes de vieux obus à *Ypérite* datant de la Grande Guerre en dormance depuis plus de 30 ans dans une usine. Le vidage des projectiles n'était plus possible, l'*Ypérite* polymérisée ayant pris masse au sein du casing des obus. L'incinération des engins dans des fours spéciaux, pris un par un fut la solution retenue par l'industriel, mais seuls les obus de calibre de 150 et 155 mm furent démolis de la sorte. Les engins de 75 mm et autres grenades ne présentèrent plus aucun intérêt commercial compte tenu du coût trop élévé de déconstruction, des risques associés, par rapport au bénéfice que ces industriels pouvaient espérer tirer de la vente du métal de récupération. Ces déchets de guerre anciens furent essentiellement abandonnés par immersion.

La demande de Pickett fut prise très au sérieux par les autorités britanniques car parallèlement des investigations scientifiques étaient menées concernant un surmortalité mystérieuses des huîtres dans l'estuaire de la Tamise et ses liens éventuels avec l'immersion par les Britanniques de munitions explosives, durant lesquelles un moratoire sur l'immersion de munitions anciennes dans la Manche fut décrété par le *British Army Council*[1518]. Les autorités françaises étaient plus favorables à l'abandon en mer de ces munitions qui encombraient les sols de France à la sortie de la Grande Guerre.

La commission se réunit à nouveau le 1er juin 1921[1519]. Le port d'où devaient se faire les coulages n'était alors plus celui de Boulogne mais de Dunkerque. Les modalités pratiques et logistiques de ces opérations avaient alors été convenue collégialement. Un site avait été identifié, qui convenait aux pêcheurs français et approuvé plus tard par les autorités belges, le *West Pit* (de coordonnées 51◦31′ N, 3◦11′ E dans les archives consultées), à proximité de l'estuaire de l'Escaut. Pickett obtint à l'issue de cette séance l'autorisation de commencer les immersions et, si on en juge par la réponse de Pickett au *British Disposal and Liquidation Commission* (DLC). Il programma ses premiers coulages au 18 juillet 1921. Mais ces opérations n'eurent jamais lieu.

Pickett avait pris du retard en France sur ses engagements contractuels et le DLC en fut informée par la France en novembre 1921 mettant en garde les autorités britanniques au sujet de cette dérive. Le DLC demanda alors à Pickett des explications[1520]. F.N. Pickett & Fils avait retardé ses opérations d'immersion car l'entreprise avait mis au point des solutions techniques lui permettant de décharger les engins visés par le coulage à des coûts moindres que ceux qui auraient été engendré par l'immersion et la perte sèche des matières constitutives des munitions. L'immersion fut une opération intrinsèquement coûteuse car nécessitait outre le transport (par voie ferrées, puis par bateau) de nombreuses manipulations de forts tonnages de matériels dangereux (chargement et déchargement des wagons, des bateaux, etc.). Selon Pickett et son courrier du 5 novembre 1921, l'immersion « *remained so long in abeyance by reason of the fact that we have been examining an alternative means of disposal of stocks of ammunition which we trusted would be more economical than the expensive dumping operations*[1521] ».

[1518] Souchen, A. (2021). *An Exceptional Mortality: Dumped Munitions, Inconclusive Science, and the Mass Death of Oysters in the Thames Estuary after the First World War. Environmental History 26* (2021): 696–723.

[1519] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the Commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Dunkerque gas shells and other ammunition. Meeting on the 1th june, 1921 at Dunkerque.

[1520] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Administrator Disposal Board (French Section) to Pickett et Fils, 5th November 1921.

[1521] The National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Pickett et Fils to Administrator Disposal Board (French Section). 10th November 1921, 1–2.

Ces avancées techniques correspondent vraisemblablement à la mise au point opérationnelle du four de neutralisation des engins chimique dans son usine *B-Factory* à Westroozebeke et/ou à sa maîtrise du brûlage à l'air libre de ce type de projectiles permettant la récupération des ferrailles et métaux. Une lettre du Lieutenant-Général Tollen, président de la Commission Centrale de Récupération belge, au Ministre de la Défense datée du 23 février 1922[1522] fournit la preuve que les installations qui traitaient initialement les engins allemands à *Croix verte* (phosgène) et à *Croix jaune* (*Ypérite*) donnaient alors totale satisfaction.

Possiblement aussi, le changement de position de F.N. Pickett & Fils concernant le devenir des munitions initialement visées par l'immersion coïncidât avec la levée du premier embargo français sur les métaux de récupération, permettant ainsi à Pickett d'écouler sa marchandise sur le marché britannique plus lucratif qu'en France. Les munitions chimiques ex-allemandes, déchets de guerre, devinrent alors elles aussi en 1922 profitables.

4.7. LE CHEMIN DE CROIX ET LE NAUFRAGE DE L'ENTREPRISE

> « *Et si l'on pense qu'il ne s'agit à Trélon que de 25 000 tonnes d'obus, et qu'il y a en France, des centaines de mille tonnes de munitions qui attendent qu'un concessionnaire les rendent à l'industrie et à l'agriculture, on peut conclure avec moi que notre sol n'est pas près d'être désarmé*[1523] »

4.7.1 Un désobusage poussif en Belgique

En Belgique, les premières difficultés apparurent pour F. Pickett & Fils dès 1920 lorsque la main d'œuvre disponible pour nettoyer les anciens champs de bataille en Flandre occidentale chuta drastiquement, tant la tâche du nettoyage et du rassemblement des innombrables dépôts ex-allemands abandonnés sur le territoire entre la Flandre et l'Allemagne semblât immense. Les autorités civiles et militaires (le Service de Destruction des Munitions (SDM)), bien optimistes, imaginèrent nettoyer la Flandre occidentale de ces engins au plus tard pour fin 1922.

Mais leur vision de la situation était biaisée car en effet les offices municipaux locals avaient omis de faire état de l'existence des nombreux dépôts ex-allemands, laissés à l'air libre, incapables aussi d'en apprécier le danger pour la population. Les destructions opérées par le SDM s'éternisèrent, notamment celles prévues sur les côtes de la mer du Nord[1524], comme sur la plage de Lombardsijde (au nord de Nieuport). En cause ? Les marées et le régime des vents. Les destructions, notamment d'engins chimiques, ne pouvaient se faire par pétardement que sur l'estran à marée basse et lorsque le vent soufflait de la terre vers la mer. Ensuite, elles ne furent exécutées qu'à la mauvaise saison et par mauvais temps, lorsque plages et dunes étaient délaissées. Les dépôts à liquider restèrent en dormance. Le flux de munitions chimiques transporté et acheminé à l'usine Pickett de Westroozebeke s'en trouva ralenti.

[1522] Centre de documentation historique des forces armées. Belgique. Document n° 49386/A/2950, Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR au Ministre de la Défense Nationale. Bruxelles, 23 février 1922.

[1523] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Figaro* du 31 mai 1921, *op. cit.*

[1524] Zanders, J.P. (1997). *The destruction of old chemical munitions in Belgium*, *op. cit*. p. 201.

4.7.2 Les freins d'une nébuleuse administrative

Les difficultés auxquelles fut confrontée cette entreprise pour prendre possession d'un seul dépôt de munitions, celui de Trélon Liessies, puis pour l'éradiquer selon des méthodes sûres et profitables, souleva chez le journaliste du *Figaro*, Pierre Soulaine, un sentiment de scepticisme quant à la faisabilité d'un « désarmement » du sol dans un bref délai, à la vue des tonnages restant à démolir dans de très nombreux dépôts du nord de la France. Ce journaliste enquêta sur les difficultés que rencontra Pickett en France pour mener à bien son entreprise (*Le Figaro* du 31 mai 1921). Il pointa les manquements et errances d'une administration nouvelle structurellement incapable de piloter les opérations de remise en état des sols et de l'élimination des surplus de guerre.

D'un pouvoir et d'une administration militaire omnipotente centrale du temps de guerre, on passa fin 1918 brutalement à une atomisation, une dispersion des pouvoirs décisionnels entre administrations du temps de paix. Ainsi les compagnies de chemin de fer furent démobilisées, jouissant de par leur statut privé d'accepter ou non de véhiculer des matériels dangereux comme des obus datant de la Grande Guerre. Soulaine dans sa tribune souligna « *L'administration des Eaux & Forêts avait de nouveau le contrôle des arbres* » avec comme conséquence « *On ne pouvait couper un seul sans l'autorisation du Ministre de l'agriculture* ». La gestion des rivières, ponts, routes et voiries avait été remise dans le giron de l'administration des Ponts & Chaussées. Les maires, préfets pouvaient à nouveau faire valoir leur droit de véto à des projets d'édification d'usines et d'ateliers de démolition de munitions. Face à ces administrations autonomes aux contours et champs d'intervention flous, plus aucune autorité centrale n'était capable d'arbitrer et faire les choix qui s'imposèrent. La passation des marchés de désobusage vers les concessionnaires privés jugés adjudicataires fut ainsi rendue poussive, tortueuse alors que la situation exigeât que des décisions furent prises rapidement pour des actes devenus, sur le terrain, urgents dans l'intérêt de la population générale. Soulaine conclut par un diagnostic sans appel au terme de son analyse au sujet l'exécution du marché Pickett de la *C-Factory*, si symptomatique des difficultés rencontrées par l'industriel avec l'administration « *Songez à la quantité de mois qu'une telle dispersion de pouvoirs représentent pour l'établissement d'une seul marché, pour la mise en marche d'une seule usine*[1525]». Très critique à l'égard de la nébuleuse administrative mise en place, Soulaine pointa du doigt le fonctionnement en silos des administrations et services de l'Etat, les lenteurs, ce qu'il exprima en ces termes « *des administrations différentes dont chacune préconise une thèse différente sans vouloir examiner la thèse du voisin* » alors que les problématiques en lien avec le « désarmement » des sols exigeaient dans les plus brefs délais une coopération entre les différentes compétences rassemblées dans les divers services de l'Etat. Pourtant, des initiatives privées, comme celles de F.N. Pickett & Fils, s'efforcèrent de trouver des solutions pour vaincre les difficultés matérielles entravant la bonne marche du désobusage en France comme en Belgique.

4.7.3 La guerre froide franco-allemande (Raymond Poidevin, Jacques Bariély)[1526]

La reconstruction en France s'inscrivit dans un climat de tension dans les relations internationales de la France avec ses anciens alliés. La France se heurta de manière croissante aux ambitions britanniques en Europe centrale. Le Traité de Versailles du 28 juin 1919 était clair. L'Allemagne, exclusive responsable de la guerre devait payer. Les Allemands refusèrent d'accepter le montant des réparations fixées suite aux conférences de Paris et de Londres de janvier et février 1921.

[1525] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Figaro* du 31 mai 1921, *op. cit.*

[1526] Beaupré, N. (2012). *1914-1945. Les Grandes Guerres*. Histoire de France. Belin Editeur.

Les Français, Britanniques, Belges et les Américains occupèrent dès fin 1918 la rive gauche du Rhin et des têtes de pont en rive droite pour faire pression sur les décideurs allemands. Jusqu'à 250 000 soldats dont 210 000 Français furent envoyés en Allemagne. Les désaccords sur le tracé des frontières du découpage des frontières de la Haute-Silésie entre Allemagne et Pologne culmina avec les tensions de l'automne et de l'hiver 1921-1922. A l'été 1922, le fossé entre les Français et leurs anciens alliés se creusa encore plus. Les Français demandèrent des « gages-productifs » pour forcer l'Allemagne à payer son dû, la dette de guerre, s'opposant aux Alliés qui insistaient pour obtenir le paiement par la France de sa propre dette de guerre. Le Président Poincaré entendait bien honorer ses dettes mais avec en prérequis le paiement par l'Allemagne de la réparation de guerre. La France retira aussi ses troupes de Turquie, laissant les Britanniques seuls face à la révolution kémaliste. L'Allemagne refusant toujours d'honorer le paiement des réparations de guerre, « l'occupation-sanction » militaire de la Ruhr eut lieu en 1923. La Sarre fut aussi séparée de l'Allemagne et placée sous la tutelle de la Société des Nations (SDN), la France disposant de la propriété de ses houillères en compensation du saccage de son propre bassin minier du Nord et du Pas-de-Calais pendant la guerre.

Après chacune des réunions préparatoires aux signatures des traités de paix, l'amertume des Français à l'égard des Britanniques ne cessa de croître. F.N. Pickett & Fils était à ce moment-là la plus grosse entreprise possédant une direction britannique opérant sur le sol français. Pickett subit alors des pressions à tous les niveaux de sa direction, par les différents départements du gouvernement français avec lesquels elle correspondait, mais aussi via la presse, à l'encontre de ses 4 000 employés et ses créanciers.

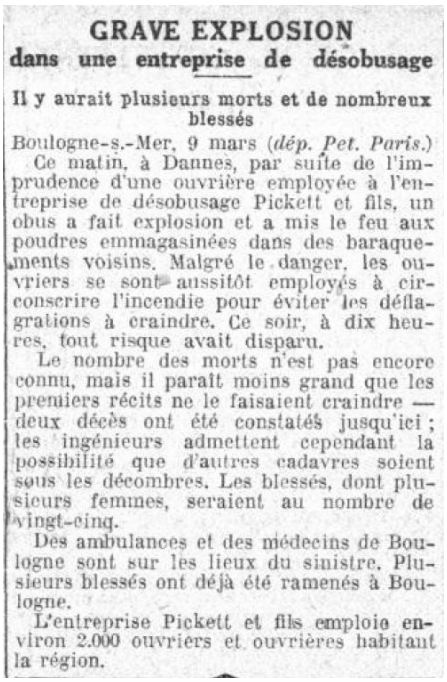
Fin 1920, le gouvernement français imposa un premier embargo complet sur l'exportation de l'acier et des ferrailles de récupération avec des effets dévastateurs pour Pickett qui devait alors vendre ses 200 000 tonnes de métaux récupérés. Finalement, après un énorme effort de F.N. Pickett, de concert avec le gouvernement britannique, l'embargo fut levé. Durant l'embargo les démolitions de munitions se poursuivirent pourtant, avec à la clé l'accroissement des stocks de ferrailles de récupération au rythme de 10 000 à 12 000 tonnes par mois. Ce stockage était couteux, sa reprise pour être écoulé encore plus. Pickett s'endetta et paya des intérêts.

En décembre 1922, le gouvernement français promulgua un décret qui prohibait l'exportation depuis la France du métal de récupération, suivi le 7 janvier 1923 par un second embargo complet sur l'exportation des métaux. Le métal devait être écoulé en France où son coût se situait sous celui du marché britannique. Les stocks s'épuisèrent et les cours remontèrent, mais Pickett ne put bénéficier de cette aubaine, ses usines étant situées bien trop loin des usines sidérurgiques. F.N. Pickett ne put honorer le contrat britannique. Il dut écouler sa marchandise dans le marché français avec des pertes de plus d'un million de livres *Sterling*. Le gouvernement britannique protesta auprès de son homologue français. Protestations restées lettre morte. Le déficit de son contrat « britannique » se chiffra déjà en 1923 à 62 000 livres *Sterling*.

4.7.4 L'huile sur le feu d'un ressentiment d'hostilité à l'égard du britannique Pickett.

Ce sentiment antibritannique constitua le terreau dans lequel s'ancra localement une véritable hostilité de la population à l'égard de Pickett, même si ce dernier était pourvoyeur de nombreux emplois là où il s'était installé. Son activité industrielle était dangereuse, vue la nature et les tonnages des matériels traités, la structure hiérarchique pyramidale de l'entreprise (direction britannique, avec des contremaîtres français), la grande diversité des origines du personnel opérant dans les usines de démolition formaient des conditions propices à la survenue d'accidents, fréquents, souvent fatals, et mal acceptés.

Certaines explosions accidentelles survenues dans les usines de démolition, qui n'étaient en fin de compte et dans l'absolu que de « simples faits divers », étaient non seulement relatés dans la presse locale mais aussi dans de grands titres de la presse nationale (l'*Humanité, Le Figaro, Journal des débats politiques et littéraires*, etc.) (Cf. Figure 217). Particulièrement marquant pour l'entreprise F.N. Pickett & Fils fut le printemps 1922 et la survenue de deux sinistres majeurs en moins d'un mois dans sa plus grande des usines, la *D-Factory* de Dannes Camiers. L'incendie et les explosions accidentelles du 9 mars 1922 détruisirent une partie des installations de l'usine et ses baraquements. Les secours luttèrent neuf heures, sous les détonations, pour venir à bout du sinistre. Le bilan était lourd avec cinq ouvriers tués (dont deux femmes), douze autres grièvement blessés et trois hangars anéantis[15271528].



GRAVE EXPLOSION
dans une entreprise de désobusage

Il y aurait plusieurs morts et de nombreux blessés

Boulogne-s.-Mer, 9 mars (*dép. Pet. Paris.*)

Ce matin, à Dannes, par suite de l'imprudence d'une ouvrière employée à l'entreprise de désobusage Pickett et fils, un obus a fait explosion et a mis le feu aux poudres emmagasinées dans des baraquements voisins. Malgré le danger, les ouvriers se sont aussitôt employés à circonscrire l'incendie pour éviter les déflagrations à craindre. Ce soir, à dix heures, tout risque avait disparu.

Le nombre des morts n'est pas encore connu, mais il paraît moins grand que les premiers récits ne le faisaient craindre — deux décès ont été constatés jusqu'ici ; les ingénieurs admettent cependant la possibilité que d'autres cadavres soient sous les décombres. Les blessés, dont plusieurs femmes, seraient au nombre de vingt-cinq.

Des ambulances et des médecins de Boulogne sont sur les lieux du sinistre. Plusieurs blessés ont déjà été ramenés à Boulogne.

L'entreprise Pickett et fils emploie environ 2.000 ouvriers et ouvrières habitant la région.

Explosion du 9 mars 1922[1529]

Nouvelle explosion au camp anglais de Dannes près de Boulogne

Trois tués — Quatre blessés

BOULOGNE-SUR-MER, 20 avril. — Télégr. *Matin*. — Une nouvelle explosion a eu lieu ce matin au camp des obus anglais Pickett, à Dannes, où le mois dernier un incendie détruisit trois hangars d'obus et tua deux femmes, trois hommes et blessa grièvement douze autres personnes.

Ce matin, à 9 h. 30, deux ouvriers qui portaient une caisse d'obus la laissèrent tomber. Celle-ci explosa, provoquant un incendie au hangar où trois cents obus environ explosèrent à leur tour.

On compte trois tués, les ouvriers qui laissèrent tomber la caisse, Jules Etienne et Jacques Vacogne, et Bigaud, de Nesles. Tous trois étaient Français et pères de famille. Quatre autres ouvriers ont été blessés.

Les explosions d'obus se sont continuées par intermittences jusqu'à 19 heures. On pense que, tout danger étant écarté, il sera possible de pénétrer demain dans le hangar où s'est produite l'explosion initiale.

Cette explosion a provoqué beaucoup d'inquiétude dans les villages voisins du camp. Les propriétaires de la plage d'Hardelot ont demandé aux autorités d'être débarrassés de ce voisinage dangereux.

Explosion du 20 avril 1922[1530]

Figure 217 : Extraits du Le Petit Parisien (Paris), 10 mars 1922, et du Le Matin (Paris. 1884). 21 avril 1922.

Moins de deux semaines après cette première catastrophe, le 20 avril 1922 au matin, deux ouvriers laissèrent tomber une caisse contenant des obus et une nouvelle explosion accidentelle survint[1531]. Trois tués et quatre blessés (cf. Figure 217).

[1527] Bibliothèque nationale de France, *La Lanterne* du 11 mars 1922.

[1528] Bibliothèque nationale de France, *Le Matin - derniers télégrammes de la nuit* – du 21 avril 1922 (Numéro 13911).

[1529] Bibliothèque nationale de France. *Le Petit Parisien* (Paris). 10 mars 1922. Extrait.

[1530] Bibliothèque nationale de France. *Le Matin* (Paris. 1884). 21 avril 1922. Extrait.

[1531] Bibliothèque nationale de France, *Le Matin - derniers télégrammes de la nuit*-du 21 avril 1922 (Numéro 13911).

L'entreprise F.N. Pickett & Fils, qui donnait alors du travail à environ 2 000 personnes dans le Boulonnais[1532], devint alors l'objet de nombreuses protestations de la population en réaction à la multiplication et à la fréquence des accidents souvent mortels survenant au sein de la *D-Factory*.

La section boulonnaise de la Ligue des Droits de l'Homme protesta en octobre 1922 contre les dangers que faisait subir l'entreprise F.N. Pickett & Fils à ses propres employés mais aussi aux populations riveraines de l'usine de Dannes, compte tenu de la présence en son sein de grandes quantités d'engins chimiques et de la survenue d'explosions accidentelles dans cet environnement toxique[1533]. Les propriétaires de la plage voisine d'Hardelot (au nord de l'usine D) « *ont demandé aux autorités d'être débarrassés de ce voisinage dangereux*[1534] ».

Ces accidents amenèrent les autorités françaises à enquêter sur les conditions de sécurité au sein de cette usine. Les usines Pickett étaient anxiogènes et furent visées par des plaintes des riverains pour des dégâts matériels occasionnés par les explosions, des gênes induites par des émanations gazeuses, ou encore des pollutions visibles des cours d'eau et suscitèrent possiblement de la méfiance des autorités françaises à l'égard de ces activités britanniques sur le sol français.

4.7.5 Faire face à des écueils techniques

Parallèlement à ces obstacles socio-politiques, Pickett dût aussi surmonter de réels écueils techniques, en particulier pour le vidage des engins ex-allemands, comme à Trélon (*C-Factory*). Les Allemands, à cours de ressources, chargèrent à la fin de la guerre, les projectiles de tranchées, les grenades, avec des explosifs de médiocre qualité, bien souvent des déchets de production du TNT. Ces mélanges complexes étaient difficiles à faire fondre à l'eau chaude et générèrent de grandes quantités de boues qui ne pouvaient être valorisées (alors mises à brûler). Le déchargement des engins ex-allemands était complexe, mais aussi polluant.

4.7.6 Des difficultés environnementales inattendues sur les plages de la mer du Nord

Ces industriels de la démolition s'installèrent au plus près des « gisements », des grands dépôts de munitions à aliéner. L'environnement de travail leur était donc imposé d'emblée. A Trélon, l'exploitation de la *C-Factory* fut gênée par l'environnement forestier. Sa plus grosse usine (*D-Factory*), à Dannes Camiers, était implantée dans un champ dunaire s'ouvrant sur la mer du Nord ; il y démolit de 110 000 tonnes de munitions, chimiques et explosives. Cet environnement particulier lui fut profitable d'une part et préjudiciable de l'autre. Pickett imagina clore son chantier de Dannes le 27 août 1924, pensant avoir éradiqué l'intégralité du dépôt. Les Britanniques, durant la guerre, n'avaient pas pris le soin de protéger leur dépôt de munitions contre la migration des dunes sous l'effet des vents. Des dépôts furent ainsi involontairement ensevelis. 403 obus de 6 pouces ressurgirent après-guerre en un seul point au gré du mouvement du sable. Puis des milliers d'obus de tout calibre, de projectiles *Stokes*, de grenades, de caisses d'explosifs (*Sabulite, Ammonal*) et de propulseurs furent mis à jour. De grandes quantités de munitions, déformées, partiellement fracturées, durant les pétardements affleuraient aussi. La collecte de ces engins et leur destruction devaient donc se poursuivre.

[1532] Bibliothèque nationale de France, *Le Petit Parisien : journal quotidien du soir*, du 10 mars 1922 (Numéro 16446).

[1533] Bibliothèque nationale de France, *Le Blessé* du 1er novembre 1922.

[1534] Bibliothèque nationale de France, *Le Matin - derniers télégrammes de la nuit*, *op. cit*.

4.7.7 Sortie de scène d'un industriel majeur du théâtre des opérations du désobusage

En 1924, les différents contrats de F.N. Pickett & Fils n'avaient pas été menés à leur terme. L'industriel ferma cette année-là son camp de Poelkappelen (*B-Factory*). Entre 1926 et 1928, il démolit d'anciennes munitions allemandes à proximité de la ferme de la Gélinerie en forêt de Spincourt, en Meuse. Les modalités de la cessation de l'activité de F.N. Pickett & Fils en France restent à ce stade des recherches obscures.

Dans sa tribune « *Un intéressant procès en Angleterre* » de quotidien national du lundi 22 avril 1929, le journaliste Soulaine du Figaro s'indigna du sort réservé par la justice britannique à l'entrepreneur. F.N. Pickett & Fils demanda à payer seulement une indemnité qui lui permit de couvrir sa perte. F.N. Pickett & Fils racheta à l'Etat britannique les munitions dont il était propriétaire à hauteur de 2 millions de livres Sterling en 1920. Malgré les difficultés rencontrées lors de ses activités industrielles de démontage de munitions en France comme en Belgique, il versa au Trésor britannique 1,7 millions de livres. Mais le Trésor ne se satisfit pas de cette somme et « *exhiba le traité dont il entendait que la « lettre » même fut respectée*[1535] ». F.N. Pickett ne put défendre sa cause et sa position « *En Angleterre, l'Etat quand il plaide, a le droit d'interdire la production devant les juges des documents présentés par son adversaire. (…) Le tribunal arbitral ne fut pas autorisé à étudier les documents que désirait produire M. Pickett, et les témoins sur lesquels il comptait ne furent pas entendus* ». La justice donna raison à l'Etat à l'encontre de F.N. Pickett. Les anciens combattants, la population générale, fustigèrent l'entreprise Pickett et d'autres industriels du désobusage, qui, exposés par voie de presse, étaient affichés comme des bourreaux uniquement mu par des intérêts pécuniaires. Mais combien de vies surent ils préserver par leur entreprise risquée ?

L'entreprise F.N. Pickett & Fils fut déclarée en banqueroute le 7 juillet 1932. Cet homme passionné par le sport automobile, de golf et les bergers allemands semble avoir connu dans son existence postérieurement à son aventure industrielle en France des difficultés. Il dédicaça en effet son livre sur les chiens bergers allemands (« *Alsatian dogs* ») usant de ces termes: » *to my Dearest Wife. Dorothy. Who in 1943 and 1944 nursed me through the* « *valley of the Shadow » and with the valliant aid of Ch. Monti and Gipsi of Welham put me on my feet again*[1536] ».

4.8. ELIMINATIONS DES SURPLUS D'EXPLOSIFS ET D'ENGINS DE GUERRE EN GRANDE-BRETAGNE.

Quelques informations ont pu être collectées concernant l'élimination et la liquidation des surplus outre-Manche. Ces archives issues du parlement et des archives nationales britanniques relatent les opérations réalisées en 1922 et 1923. Les Britanniques ouvrirent des usines de démolition de munitions dans le nord de la France mais aussi sur le sol britannique, en particulier, pour la neutralisation de projectiles explosifs chargés avec du TNT. Elles furent exploitées par la société Cohen également active dans le nord de la France. En mai 1923, elles étaient au nombre de six, dont quatre en activité (Farlington, Credenhill, Bramley (*Central Ammunition Depot, Bramley*) et Banbury) et deux à l'arrêt (Gainsborough et Pembrey).

[1535] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. « *Un intéressant procès en Angleterre ». Le Figaro*, lundi 22 avril 1929.

[1536] A ma plus chère épouse. Dorothée. Qui en 1943 et 1944 qui m'a soigné dans ma traversée de la « vallée des ombres » et avec l'aide courageuse de Ch. Monti et Gipsi de Welham qui m'ont remis sur mes pieds.

Le site de Bramley fut créé en 1917 pour accueillir une usine de production de munitions, un camp de prisonniers et un vaste dépôt (*Bramley Central Ammunition Depot*). En 1922, il accueillit une école de déminage / désobusage (*School of Ammunition*) placée sous la direction du *Royal Army Ordnance Corps.* Une partie de l'usine de Bramley était occupée en 1922 par *The United Steel Company* « *and there engaged in breaking down ammunition* »[1537], possiblement pour la récupération commerciale des ferrailles issues de la neutralisation des engins de guerre.

Cette société neutralisa des fusées stockées à Bramey, sous contrat avec la *Commission for Disposal & Liquidation* « *400,000 fuzes referred to have been already sold by the Commission to the United Steel Company who, as I explained in my reply of the 4th instant, have obtained permission to break them down on the spot. It is obvious that this contract, and similarly the contracts for the ammunition referred to in question No. 79, cannot be cancelled* »[1538].

Ces opérations furent menées (sur un tonnage inconnu) en toute sécurité et émaillées par un seul incident, l'explosion à Banbury qui fut suivi de nombreuses plaintes des proches résidents de l'usine[1539]. A Bramley, l'émoi et les craintes ne furent pas suscités par des explosions mais par les fumées noires émises par les brassiers. Les témoignages des riverains directement affectés par ces opérations sont éloquents quant aux nuisances induites : anxiété, possibilités d'atteintes à la santé.

Mrs. Cole de Basingstoke, une bourgade située à proximité de Bramley, se plaignit par courrier du 2 Mai 1923 en ces termes « […] *the small field next to it, can with difficulty be cultivated, as being covered with black poisonous smoke, the man cannot often plough it. This smoke continues aver this field into m garden andinto my house ; great columns of black smoke […], so that the whole atmosphere is poisoned. It prevents us all from sleeping, this poison. […] Last January a bomb was let off which broke seven of my windows. […]* ».

Ici, comme en France, lorsque survinrent des accidents et incidents dans les dépôts résiduels issus de la guerre à éliminer, ces situations convoquèrent chez les populations exposées des scènes et situation de guerre peut être vécues. Ici, le rapprochement avec des conditions de combats dans le Saillant d'Ypres, qui marquèrent fortement les Britanniques par leur durée, violence et intensité durant la Grande Guerre, fut évoqué par un riverain, possiblement ancien combattant « *I do not think I shall be able to stay here if it goes on much longer ; as I write the house is shaking with the letting off of ammunition – as Cuthbert says, it is quite like a morning in the « Salient » to be here* »[1540]. Les nuisances à Farlington étaient purement visuelles « *Extremely dense clouds of smoke , in which the presence of Picric Acid could be clearly detected, were being involved » but owing to the position of the Factory this caused no inconvenience to the neighbourhood* [1541]».

[1537] UK Parliament. British Army. Volume 152: debated on Tuesday 4 April 1922. Sir L. Worthington-Evans.

[1538] UK Parliament. Surplus Ammunition (Breaking-Up). Volume 152: debated on Thursday 6 April 1922. Sir L. Worthington-Evans.

[1539] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Notes on the subject of Breaking Down of Shells and Burning of Explosives. SEcretary Technical Gas Committee. Signed : R.L. Corbett. 17st May 1923.

[1540] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Copy of leter from Mrs. Cole of Sherfield Hallm Basingstoke date May 2nd to Mr. Ernest Crawley. National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237.

[1541] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237.

Le Comité identifia aussi dans cette usine 21 tonnes de munitions chimiques en tout genre et décida de les abandonner par immersion « *The Committee recommanded that this material should be dumped* »[1542]. Pendant que le TNT était brûlé dans chacune des usines, Mr. Allcock de la *Disposal & Liquidation Commission* fit suspendre début mai 1923 le brûlage de *Lyddite* (nom attribué par les Britanniques à la *Mélinite* ou 2,4,6-trinitrphénol), compte tenu des risques inhérents à ces opérations (dégagement de fumée noire et réellement toxiques, risques d'explosions violentes), et des nombreuses pleines émanant des populations riveraines.

Le 4 mai 1923 restaient encore à brûler et à neutraliser des quantités considérables de projectiles chargés de *Lyddite* (soit environ 210 000 projectiles)[1543] :

- 115 000 engins à Bramley (durée de brûlage estimée à cinq mois)
- 70 000 engins à Credenhill (durée de brûlage estimée à neuf semaines)
- 25 000 engins à Banbury (durée de brûlage estimée à deux mois)
- 160 000 engins à Farlington (durée de brûlage estimée à trois mois).

Afin de rassurer les populations le brûlage de TNT à Bramley fut stoppée et 600 tonnes de TNT transférés à Farlington où les brûlages étaient opérés au rythme de 12 tonnes de TNT et 340 projectiles de 6'' à Lyddite par foyer[1544] .

Ce transfert ne concernait que le TNT, l'usine de Bramley n'ayant pas encore entamé le brûlage. Les brûlages à Bramley d'engins chargés de *Lyddite* et d'*Ypérite* (« *Mustard* ») furent déconseillés par le *Technical Gas Comitee*. Seul le brûlage de *Cordite* (poudres propulsives) fut autorisée[1545] .

5. Liquidation des surplus de guerre en Allemagne.

5.1. LA DEMILITARISATION DE L'ALLEMAGNE ET L'OCCUPATION DE LA RHENANIE EN REPONSE AUX EXIGENCES DE L'ARMISTICE ET DU TRAITE DE PAIX. CADRE HISTORIQUE

L'Allemagne avait débuté la Première Guerre mondiale forte de l'Artillerie la plus moderne et le plus puissante au monde. Cette arme, qui s'est diversifiée, spécialisée dans une guerre de matériel de plus en plus technicisée, resta un des fers de lance de l'Armée du *Reich* tout au long de la guerre. La réduction de l'arsenal de l'Artillerie, munitions, poudres et explosifs, canons, était de facto une condition *sine qua none* du désarmement de l'Allemagne au moment de l'armistice et plus encore à celui du Traité de Versailles. Il fallait réduire la puissance de feu allemande pour l'empêcher de recommencer.

[1542] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of the 15th Meeting of the Technical Gas Commitee held at RAOD (Royal Army Ordnance Depot) Depot Bramley, and CSD Depot 128 at Farlington, on Tuesday the 15th May 1923. Signed : Secretar Technical Gas Committee.

[1543] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of a meeting held in Room 2, Block B, Earls Court, 4th May, 1923. Signed : Captain G. Eades.

[1544] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of the 15th Meeting of the Technical Gas Commitee held at RAOD (Royal Army Ordnance Depot) Depot Bramley, and CSD Depot 128 at Farlington, on Tuesday the 15th May 1923. Signed : Secretar Technical Gas Committee.

[1545] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of the 15th Meeting of the Technical Gas Commitee held at RAOD (Royal Army Ordnance Depot) Depot Bramley, and CSD Depot 128 at Farlington, on Tuesday the 15th May 1923. Signed : Secretar Technical Gas Committee.

Le désarmement s'opéra principalement en deux temps. Le premier fut celui inauguré par l'armistice du 11 novembre (puis l'entrée des troupes alliées en Allemagne pour l'occupation de la rive gauche du Rhin) et se termina avec l'entrée en vigueur du Traité de Versailles le 10 janvier 1920. Cette période, marquée par des négociations houleuses entre Alliés lors des conférences pour la paix, à Paris, concernant le paiement des réparations de guerre, fut aussi jalonnée par les prolongations de l'armistice du 11 novembre 1918. L'armistice imposa d'abord le cessez-le-feu immédiat six heures après sa signature, puis l'évacuation des territoires occupés, la réappropriation par la France des territoires anciennement annexés et enfin l'occupation de la Rhénanie (rive gauche du Rhin) par les troupes alliées.

Ces exigences étaient exprimées dans les points II et V de la Convention d'armistice du 11 novembre 1918 : point II « *Évacuation immédiate des pays envahis : Belgique, France, Luxembourg, ainsi que de l'Alsace-Moselle, réglée de manière à être réalisée dans un délai de quinze jours à dater de la signature de l'armistice. […]* » ; point V « *Évacuation des pays de la rive gauche du Rhin par les armées allemandes. Les pays de la rive gauche du Rhin seront administrés par les autorités locales, sous le contrôle des troupes d'occupation des Alliés et des États-Unis. […] [qui] assureront l'occupation de ces pays par des garnisons tenant les principaux points de passage du Rhin (Mayence, Coblence, Cologne) avec, en ces points, des têtes de pont de 30 kilomètres de rayon. […]* »)

L'armistice du 11 novembre 1918 demanda aussi à ce que l'armée allemande remette aux forces alliées le « *matériel de guerre fixé par l'Armistice* » présent dans la zone évacuée par l'Armée allemande. Ce matériel, dont les munitions, devait être livré intact « *Il ne sera fait aucune destruction d'aucune sorte* » ((point VI) de l'armistice du 11 novembre 1918), et prit en charge par les armées alliées « *Ce matériel de guerre sera remis à chacune des armées alliées et des Etats-Unis, par chacun des grands groupements tactiques de l'armée allemande, dans les proportions qui seront fixées par la Commission internationale permanente d'Armistice* » ((point III), note annexe 1 de l'Armistice du 11 novembre 1918). Les clauses de l'armistice ne fixèrent aucun cadre quant au devenir des munitions allemandes livrées aux Alliés.

Les troupes françaises pénétrèrent en Alsace et en Moselle les 18 et 19 novembre 1918. Le 7 novembre 1918, le général Pershing, Général en chef de l'AEF, constitua une IIIe Armée américaine organisée à partir du 14 novembre 1918, avec à sa tête le Major Général Joseph. T. Dickman. Cette nouvelle armée prit le nom de *American Army of Occupation in Germany*.

L'avancée des Alliés sur le Rhin et en territoire allemand, débuta le 17 novembre 1918, en rencontrant ni résistance ni hostilité. Le 1er décembre 1918, des éléments de deux armées françaises franchirent la frontière et pénétrèrent en Allemagne (le Groupe d'Armées Fayolle et ses deux armées, la VIIIe du général Gérard et la Xe du général Mangin[1546]). L'Armée britannique y entra ensuite le 3 décembre 1918[1547].

Le 14 décembre 1918, le territoire visé était occupé par les Alliés: les Belges (sous les ordres d'Armand Huyghé (cf. Figure 218)) au nord marchant sur Aix-la-Chapelle, en direction de Düsseldorf, les Britanniques et les Américains au centre progressant respectivement vers Cologne et Coblence, les Français au sud s'avançant en direction de Mayence (rive gauche) puis Francfort-sur-le-Main (rive droite) (cf. Figure 219).

[1546] Jardin, P. (1986). « *L'occupation française en Rhénanie, 1918-1919. Fayolle et l'idée palatine*. ». *Revue d'histoire moderne et contemporaine, tome 33* n°3, Juillet-septembre 1986. pp. 402-426;

[1547] Philip Gibbs *On the Allied Occupation of the Rhineland, December 1918* accessed 11 September 2010

Jusqu'à l'entrée en vigueur du Traité de Versailles signé le 28 juin 1919, le 10 janvier 1920, ce régime d'occupation militaire fut maintenu en place[1548].

L'Armée française du Rhin fut créée en octobre 1919. Ses effectifs oscillaient entre 100 000 et 210 000 hommes dans les territoires rhénans selon l'état de tension des relations franco-germaniques. Au début de 1919, la IIIe Armée des USA comptait quelque 250 000 hommes. Elle fut dissoute en juillet 1919 et remplacée par les Forces américaines en Allemagne (*American Forces in Germany* (AFG)) sous le commandement du général de division Henry Tureman Allen (cf. Figure 218).

L'objectif premier de cette occupation alliée en Allemagne était de s'assurer du maintien des conditions de la paix en désarmant l'Allemagne mais aussi en fixant sur le Rhin, une frontière « naturelle » stratégique des pays situés à l'ouest de l'Allemagne. Alain Tardieu, dans ses mémoires du 25 février 1919, définit la nécessité d'une politique rhénane comme une « *garantie d'ordre physique* » pour assurer durablement la paix. Des têtes de pont de 30 km en rive droite du fleuve furent mises en place au niveau des principaux ponts et zones de franchissement, contrôlables, du fleuve : à Mayence, sous contrôle français, à Cologne sous contrôle britannique et à Coblence sous contrôle américain. Les Français étaient alors favorables à accorder à ces territoires une certaine forme d'autonomie (via un plébiscite d'autodétermination), afin de créer un territoire tampon entre la France et l'Allemagne, garantie supplémentaire de non-agression de la France par l'Allemagne. En effet, c'est depuis la rive gauche du Rhin que les offensives allemandes de 1870 et 1914 furent préparées puis lancées. Mais les Britanniques et les Américains s'y opposèrent, notamment au nom du principe Wilsonien du droit des peuples à disposer d'eux-mêmes.

L'Allemagne était ainsi divisée en deux zones, l'une en Rhénanie occupée et sous contrôle des Alliés et l'autre au-delà du Rhin, la zone non occupée, en proie à des instabilités politiques et révolutionnaires qui virent progressivement se mettre en place un nouveau régime, la République de Weimar.

Le Traité de Versailles du 28 juin 1919 précisa les mesures prises pour la réduction des munitions et de l'armement de l'Allemagne ; elles s'inscrivirent plus généralement dans les exigences de réduction des moyens de l'Artillerie allemande, fleurons de l'armée impériale durant la guerre, et le désarmement de l'Allemagne vaincue. Les raisons invoquées par les Alliés dans les négociations houleuses (des conférences de la paix) qui précédèrent la signature du Traité de Versailles étaient l'objet de différends traversés par des différences d'appréciation parmi les conférenciers. La position de la France eu égard au désarmement de l'Allemagne différait de celles des Alliés. Le désarmement était pour la France l'opportunité de démanteler les capacités matérielles mais aussi morales de l'Allemagne à reprendre une guerre contre la France.

Les Britanniques étaient bien plus préoccupés par leurs rivalités avec les Etats-Unis, la Russie bolchévique et la suprématie continentale française. Les Britanniques étaient partisans d'un désarmement le plus rapide possible pour pouvoir se concentrer sur leurs enjeux géopolitiques du moment. La destruction à court termes des munitions et matériels de guerre et la réduction du nombre d'hommes au sein de l'armée Allemande étaient des conditions suffisantes pour les Britanniques.

[1548] Beaupré, N. (2009) « *Occuper l'Allemagne après 1918. La présence française en Allemagne avant l'apaisement de Locarno ou la continuation de la Grande Guerre par d'autres moyens ». Revue Historique des armées. Les conséquences militaires des traités de paix*. p. 254.

Mais globalement, les Alliés s'accordèrent sur trois points.

1) La démilitarisation de l'Allemagne sans retard était d'abord préventive, pour annihiler toute velléité de recommencer, « *Il fallait arracher à l'Allemagne le moment et la tentation de recommencer ; réduire, dans le présent immédiat, son état militaire au minimum compatible la nécessité de sa défense et le maintien de l'ordre*[1549] ».

2) Ensuite, il fallait exercer sur l'Allemagne une pression militaire pour la contraindre à accepter les conditions des réparations de guerre (cette menace militaire dans l'armistice renouvelé du 16 février 1919).

3) Enfin la démilitarisation de l'Allemagne était aussi un moyen de réduire les forces alliées nécessaires au maintien d'une supériorité militaire et ainsi d'accélérer la démobilisation des troupes et matériels des forces alliées. « *Plus que personne aussi, il [ndlr : Georges Clémenceau] voulait que les Alliés conservassent, jusqu'à la fin des négociations, un instrument militaire supérieur à celui de l'Allemagne et, pour cela encore, il avait hâte de réduire la force allemande*[1550] ».

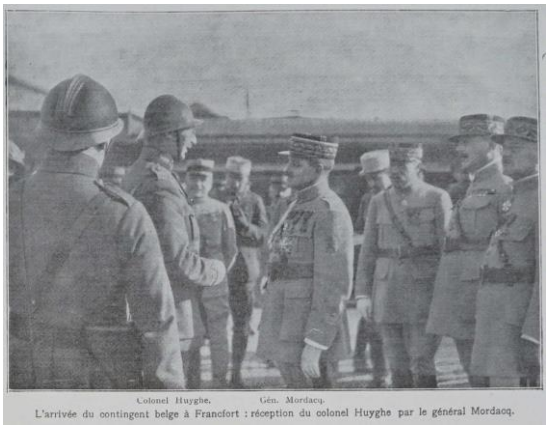
En dépit du rôle joué par le Président Wilson lors de la conférence de paix, les États-Unis, bien qu'ils fussent mentionnés en tête du Traité de Versailles, qui leur attribuait un rôle d'arbitre dans certaines circonstances, ne le ratifièrent pas. Le Sénat des Etats-Unis, hostile au système de garanties prévu et à la Société des Nations (SDN), désavoua le Président Wilson, en refusant, une seconde fois l'autorisation de ratification du Traité de Versailles le 19 mars 1920. Le Président démocrate Woodrow Wilson fut victime en 1919 d'un accident vasculaire cérébral qui le rendit inapte à exercer ses fonctions. Les démocrates perdirent aussi les élections de mi-mandat de 1918. Celui qui fit entrer les Etats-Unis dans la guerre s'éclipsa, le républicain Warren G. Harding lui succéda à la présidence du pays suites aux élections de 1920. Le programme politique générale de Harding se basa sur le « retour à la normale », sur l'isolationnisme après les ingérences et l'interventionnisme de Woodrow Wilson dans la politique européenne.

Le Traité de Versailles imposa à l'Allemagne (i) des quotas de munitions et matériels de guerre à ne pas dépasser, (ii) le signalement auprès des forces alliées des dépôts de munitions et des usines de production d'armement, poudres, explosifs et munitions dont l'exploitation devait être soumise à l'approbation des gouvernements alliés et enfin, (iii) la destruction ou la mise hors d'usage des matériels excédentaires.

[1549] Tardieu, A. (1921). *La Paix*, *op. cit*.

[1550] *Ibid.*

Théodore Dickman (au centre), Commandant Général du IVe Corps, avec les généraux Frank L. Winn (à gauche), Commandant Général de la 89e division, et le français Augustin Gérard (à droite), Commandant Général de la VIIIe Armée, à Lucey, août 1918[1551].



Arrivée du contingent belge à Francfort-sur-le-Main et réception du colonel Armand Huyghé de Mahenge (à gauche) par le général français Mordacq (au centre)[1552]. Participation belge à l'occupation de Francfort, mars-avril 1920.

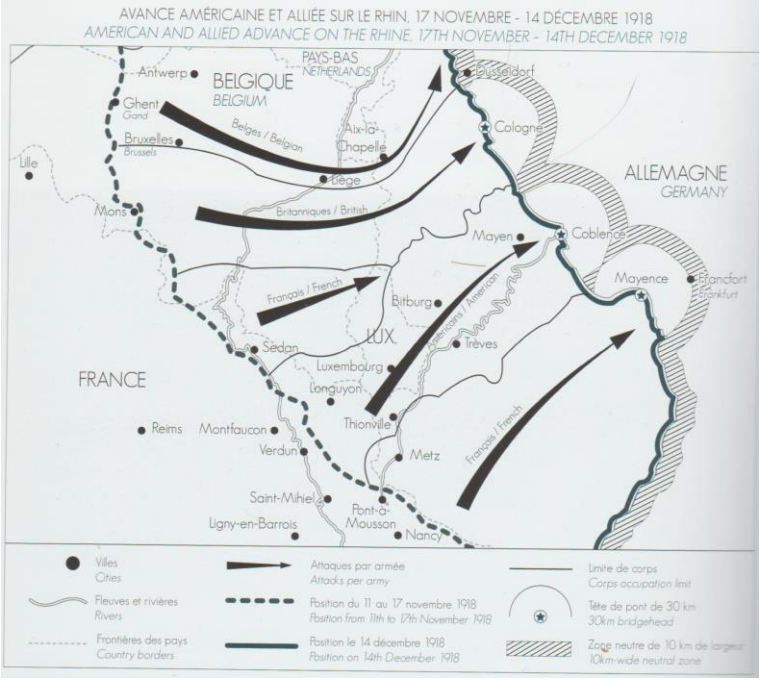


Figure 219 : Avance française et alliée sur le Rhin, 17 novembre-14 décembre 1918[1553].

[1551] War Department. Army War College. Historical Section. World War I Branch. ca. 1918-ca. 1948, number 11-SC-38546 - NARA - 55236251-cropped.

[1552] Journal l'Illustration,1920. https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Armand_Huygh%C3%A9_de_Mahenge#/media/Fichier%3ALe_col_Huyguens_et_Degoutte_Illustration_1920.JPG

[1553] Extrait de François, D. et François, G. (2017). *I want you. Le Corps expéditionnaire américain – France 1917 – 1918*. OREP Editions. 2017, p.276.

Ces exigences étaient principalement rassemblées dans les Articles 166, 167, 168 et 169 du Traité avec des mises en application échelonnées selon le calendrier suivant :

1. Dans les deux mois à dater de l'entrée en vigueur. Article 167, §2. - Réduction de 1 500 et 500 coups par pièces, suivant les calibres, des canons des places fortes. Article 169. – Livraison aux Alliés pour destruction de tout le matériel de guerre, quel qu'il soit, en excédent des quantités autorisées. « *Dans le délai de deux mois, à dater de la mise en vigueur du présent Traité, les armes, les munitions, le matériel de guerre allemand, compris le matériel quel qu'il soit de défense contre les aéronefs, qui existent en Allemagne et qui seront en excédent des quantités autorisées, devront être livrés aux Gouvernements des Principales Puissances Alliées et associées pour être détruits ou mis hors d'usage. Cette livraison sera effectuée sur tels points du territoire allemand, qui seront déterminés par lesdits Gouvernements. Dans le même délai, les armes, les munitions et le matériel de guerre provenant de l'étranger, y compris le matériel de défense contre aéronefs, en quelque état qu'ils se trouvent, seront livrés auxdits gouvernements, qui décideront de la destination à leur donner* ». Article 180. – Désarmement et démantèlement des fortifications dans la zone démilitarisée.

2. Dans les trois mois à dater de l'entrée en vigueur. Article 168. – Suppression de toutes autres usines et des arsenaux que ceux portés à connaissance et soumis pour approbation des gouvernements des principales puissances alliées et associées.

3. Avant le 31 mars 1920. Article 166. – Limitation et entreposage des stocks de munitions. « *Dans le même délai, le Gouvernement allemand devra entreposer ses stocks dans des lieux dont il donnera notification aux Gouvernements des Principales Puissances Alliées et associées* ». Article 42 et 43. – Démilitarisation complète de la région rhénane.

L'Article 171 interdit l'usage des toxiques de guerre en Allemagne : « *L'emploi des gaz asphyxiants, toxiques ou similaires, ainsi que de tous liquides, matières ou procédés analogues, étant prohibé, la fabrication et l'importation en sont rigoureusement interdites en Allemagne. Il en est de même du matériel spécialement destiné à la fabrication à la conservation ou à l'usage des dits produits où procédés* ».

Les Alliés créèrent une liste publiée de matériel à livrer comprenant des lance-flammes, obus, fusils, grenades, véhicules blindés, pièces d'artillerie, fusées et détonateurs connue sous le nom de « Livre Bleu[1554] ». Ce désarmement se concrétisa par une réduction de 100% des pièces lourdes, 54% des pièces de campagne et de 50% des munitions.

[1554] Huster, Richard J. (2006). *German Disarmament After World War I: The Diplomacy of International Arms Inspection 1920–1931*. London.

Les excédents de munitions en Allemagne (puis les injonctions alliées pour leur neutralisation) découlèrent donc directement de la démilitarisation en lien avec les conditions de l'armistice du 11 novembre 1918 (et ses reconductions successives) mais surtout des exigences du Traité de Versailles.

La Haute Commission Interalliée des Territoires Rhénans (HCITR), organisme civil interallié destiné à administrer les territoires allemands occupés, fut créée le 28 juin 1919 par les gouvernements alliés. Une commission interalliée pour le contrôle du respect des exigences du Traité de Versailles (*Interalliierten Militär Kontrollkommission* (IMKK), Commission Militaire Interalliée de Contrôle (CMIC)), concernant la production, le stockage et la destruction des matériels de guerre et matières explosibles fut aussi mise en place au dernier trimestre 1919.

Son cadre du travail reposait sur les Articles 203 à 211 du Traité de Versailles. Elle comprenait trois sous-commissions dont les directions incombaient à chacun des Alliés (à l'exception des belges) au regard de leurs intérêts et priorités respectifs. Il s'agissait de la sous-commission (i) sur les armements, dirigée par les Britanniques (le major-général Francis Bingham), (ii) des personnels et effectifs de l'armée allemande dirigées par les Français et enfin (iii) sur les fortifications, administrée par les Américains. La présidence de la sous-commission française fut attribuée au général Charles Nollet, qui lorsqu'il fut nommé Ministre de la Guerre en 1924, fut remplacé par le général Camille Walch qui resta en fonction jusqu'au 31 janvier 1927[1555]. La sous-commission française arriva à Berlin en octobre 1919. Richard von Pawelsz y représenta l'Allemagne en tant que commissaire du IIe *Reich* (*Reichskommissar*).

5.2. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE. INTRODUCTION ET PHASAGE.

Comme explicité dans ce qui précède, le désarmement et la démilitarisation de l'Allemagne s'opéra en deux temps.

Le premier, est bornée par l'entrée des troupes alliées en rive gauche du Rhin fin novembre 1918 et par l'entrée en vigueur du Traité de Versailles du 10 janvier 1920.

Durant cette période, la démilitarisation débuta par l'application des points IV, V et VI de l'armistice du 11 novembre 1918 exigeant l'évacuation des territoires de la rive gauche du Rhin placés sous l'administration des armées alliées d'occupation et la livraison aux Alliés de matériels de guerre et l'abandon des approvisionnements militaires laissés intacts. Aucune clause de l'armistice (et ses trois reconductions et conventions additionnelles) n'incita ou n'imposa la destruction de ce matériel de guerre.

L'année 1919 fut principalement consacrée aux opérations de rassemblement des munitions, matières et matériels de guerre sur des dépôts bien ciblés.

[1555] Huber R. E. (1981). *Die Weimarer Reichsverfassung*, W. Kohlhammer. p. 474.

La seconde phase débuta avec l'entrée en vigueur du Traité de Versailles le 10 janvier 1920 et l'affirmation explicite d'obligations de destructions des restes et surplus de guerre. Deux situations doivent être distinguées alors dans l'Allemagne de l'immédiat après-guerre :

1. Les démolitions opérées par des entreprises privées (allemandes et françaises) placées sous contrôle militaire direct des Armées d'occupation dans la partie occupée de l'Allemagne (Rhénanie, rive gauche du Rhin et ses têtes de pont en rive droite).

2. Les démolitions opérées par des entreprises privées en zone non occupée mais placées sous le contrôle de l'IMKK à compter de l'entrée en vigueur du Traité de Versailles.

Les desseins des démolitions des surplus de guerre entrepris dès la cessation des hostilités différèrent donc en Allemagne par rapport au quart nord-est de la France et à la Belgique. L'objectif affiché en France comme en Belgique était de libérer les sols labourés par les bombardements pour les restituer à un usage agricole sécurisé, nettoyer les anciens champs de bataille et les zones des armées qui entravaient les reconstructions et la libre jouissance des propriétés privées et protéger les populations. En Allemagne, il s'agissait de respecter les clauses de démilitarisation de l'armistice puis des exigences du Traité de Versailles.

5.3. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE (ZONE NON OCCUPEE).

5.3.1 Mise en place d'une organisation privée sous contrôle militaire interalliée

Bien qu'aucune clause de l'armistice du 11 novembre 1918 (et ses trois reconductions et conventions additionnelles successives), incita ou encore imposa au gouvernement de la République de Weimar, la démolition des restes et surplus de guerre, ces opérations furent engagées dans un cadre qui apparaît volontaire et privé. En Allemagne, comme en France, ces productions de guerre étaient propriétés d'Etat. Des contrats furent passés entre le gouvernement allemand (Ministère du Trésor) et des entreprises privées pour la démolition industrielle et commerciale des munitions excédentaires dans le cadre de la démilitarisation de l'Allemagne. Les ferrailles et explosifs issus de ces opérations de démantèlement étaient réinjectés dans le circuit économique du temps de paix. Les opérations furent placées sous contrôle militaire alliés, l'Armée allemande fut bien entendue écartée du processus. Il fallait être certain côté Alliés que du matériel militaire n'échappasse pas aux inventaires et contrôles et ne finisse illicitement dans les mains des forces allemandes dont la dotation en armement était à réduire.

A la différence de ce qui fut fait en France, où des entreprises opérèrent isolément, dans un contexte où progressivement la mise en concurrence devint la règle, en Allemagne, les entreprises compétentes en matière de démolition de munitions s'organisèrent en syndicat et/ou en consortia. C'est ainsi que les démolitions industrielles contractuelles à but commercial semblèrent avoir été enclenchées en Allemagne dès début 1919. Fut créée à Hambourg la *Gesellschaft zur Verwertung von Heeresgut mbH* (littéralement « la société anonyme à responsabilité limitée pour la transformation des matériels de guerre ») avec pour objectifs la transformation et la valorisation des munitions ayant appartenu au *Reich*. Pour cela, trois usines furent construites dans le nord de l'Allemagne[1556] : Zweedorf en Mecklenburg-Poméranie (à 2 km au nord-est de cette localité), les sites de Witzeeze (à un kilomètre au nord-est du village) et de Güster (immédiatement au sud du village) dans le Schleswig-Holstein (cf. Figure 220).

[1556] Der Königliche Landrat des Kreises Herzogtum Lauenburg, St. Georgsburg B. Ratzeburg (15.11.1919): Schreiben an den Oberpräsidenten in Kiel wegen Sicherung von Heeresgut vor kommunistischen Putschen. (LASH Abt. 301 Nr. 5733).

Ces trois usines étaient regroupées dans un périmètre de 10 km. L'historique des trois sites est décrit en détail dans Preuss et al (2000)[1557]. Mais du fait du manque de capacités de transport (pour desservir les usines) et des quantités très importantes d'engins visés par ces démolitions, mais aussi pour réduire les risques inhérents aux manutentions lors des chargements et déchargements, la décision fut prise de détruire les projectiles en lieux et place, au plus près de leur nombreux lieux d'entreposage. Pour conduire ces opérations le *Reichsverwertungsamt (*Office pour la valorisation, l'équivalent du Sous-Secrétariat pour la Liquidation des Stock ou le *Disposal Board),* en délégation du *Reichsschatzministerium* (Ministère du Trésor) mandata un syndicat d'entreprises privées, le *Zerlegungssyndikat* (syndicat pour le démontage) via un contrat cadre (*Syndikatsvertrag*) signé le 13 septembre 1919. Ce syndicat regroupa une soixantaine d'entités réputées compétentes dans le domaine des munitions, et alors chargées de l'achat et de la destruction des munitions stockées sur l'ensemble du territoire non occupé de l'Allemagne, à l'exception de la Bavière et de la Saxe, et destinées à être vidées[1558].

Parmi ces entreprises formant ce consortium, certaines jouèrent un rôle de premier ordre. Citons par exemple: *Berlin-Burger Eisenwerk AG* (Berlin), *Deutsche Sprengstoff AG* (Hamburg). *Dynamit AG vorm. Alfred Nobel & Co* (Hamburg), *Gesellschaft zur Verwertung von Heeresgut mbH* (Hamburg), *Gewehrfabrik Burgmüller & Söhne* (Kreiensen), *Norddeutsche Sprengstoffwerke AG* (Hamburg), *Ottenser Eisenwerk AG* (Altona – Ottensen), *R. Wolf AG* (Magdeburg – Buckau), *Securitas Verwertungsgesellschaft mbH* (Bochum), *Sprengstofffabriken Hoppecke AG* (Cologne) et *Sprengstoff Glückauf AG* (Hamburg)[1559].

La section § 3 du contrat S*yndikatsvertra*g comportait des clauses d'exclusion à l'égard de certaines munitions à chargement chimiques « *Gelb- und Grün-kreuzgeschosse sind ausgeschlossen, da sie vernichtet werden müssen* » (« les projectiles à *Croix jaune* et *Croix verte* sont exclues [ndlr : de la récupération] car ils doivent être détruits »). Ces munitions devaient être démolies en dehors du cadre commercial établi avec le syndicat.

Le Ministère de la Guerre ordonna courant 1919 qu'une grande proportion, mais aucunement la totalité, des munitions chimiques, soit rassemblée à Breloh. Breloh est situé dans la Lande de Lünebourg (*Lünerburgerheide*), à proximité de Münster (située dans le Nord du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie) (cf. Figure 220). Il s'agissait du plus grand atelier central de chargement de munitions chimiques de l'Armée allemande durant la Première Guerre mondiale (avec Berlin Adlershof), mais aussi le fief des expérimentations du père de la guerre chimique en Allemagne, Fritz Haber.

[1557] Preuss, J., Eitelberg, F., Dehner, U., Albrecht, G., Laskowski, S. (2000). *Modellhafte Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und – vernichtung nacg dem 1. Weltkrieg. Standorte Zweedorf und Nüssau. Band 1. Historische Erkundung*. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dezember 2000.

[1558] *Ibid.*

[1559] *Ibid.*

Figure 220 : Géolocalisation des principaux sites de destruction de munitions en Allemagne.

Aucune pression ne semblât s'être exercée sur l'Allemagne pour détruire son arsenal chimique avant l'entrée en vigueur du Traité de Versailles en janvier 1920. On dénombra ainsi en novembre 1919 sur le site de Zweedorf [1560]:

- 1 000 bombes incendiaires sans fusée,
- 200 000 projectiles d'artillerie de campagne de 75 mm sans fusée,
- Un nombre indéfini de munitions françaises et russes de prises de guerre sans fusée,
- 50 000 projectiles de défense anti-aérienne sans fusée,
- 100 000 grenades « œuf » prêtes à l'usage,
- 100 000 grenades à manche prêtes à l'usage,
- 50 000 unités de *Wurfgranaten* prêtes à l'usage,
- Un nombre indéfini d'engins chimiques.

En Allemagne, comme en France, bien que des décisions aient été prises pour la liquidation des arsenaux résiduels en 1919, les démolitions ne débutèrent pas sur le plan opérationnel avant fin 1919. Les munitions et matériels de guerre furent principalement rassemblés durant l'année 1919 et les entreprises privées s'organisèrent en prévision des opérations. Le cadre organisationnel et les méthodes de travail à suivre pour démolir les engins, notamment ceux à chargement chimiques, peinèrent à être fixés.

Dans un premier temps, la solution la plus pragmatique et radicale fut envisagée pour les engins chimiques : l'immersion. Mais vues les quantités de projectiles à charger, transporter, décharger et des coûts prohibilitifs associés, cette option fut écartée. Une autre alternative dut être recherchée.

Pour solutionner la question de la neutralisation des engins chimiques, une autre solution fut localement trouvée. Ainsi au dépôt de munitions d'Ofenerdiek à proximité de Bremen (cf. Figure 220), les projectiles arséniés à *Croix bleue* et ceux ypérités à *Croix jaune* furent enfouis dans d'anciens entonnoirs de pétardement à seulement un mètre de profondeur. Fin 1921, ces engins furent exhumés et pétardés sur place. Mais en Allemagne, comme en France, la neutralisation de telles quantités de projectiles chimiques fut une chose nouvelle pour laquelle des solutions fiables, rapides et sûres restaient à inventer. Les instructions alors en vigueur au sein de l'Armée allemandes, rassemblées dans « *Merkblatt für Entladestellen von Artilleriemunition* »(Notice pour le déchargement de munitions d'artillerie) et « *Vorlaüfige Vorschrift für Entlaborieren von Gas- und Nebelgechossen* » (Règlement provisoire pour le démantèlement des projectiles chimiques et fumigènes) ne renfermaient aucune indication pour la mise en œuvre concrète de ces opérations. L'une des entreprises mandatée pour détruire ces engins, du nom de *Evaporator AG* protesta en ces termes « *A cette occasion il doit être expressément signalé, qu'il n'y a ni expérience, à l'exception de la nôtre, ni règlement mis à disposition par les autorités* [1561]».

Les sites industriels identifiés ci-avant servaient de dépôts de rassemblement de munitions dont les tonnages crurent de jour en jour, jusqu'à atteindre des dimensions considérables et telles que des accidents d'ampleur ne pouvaient être évités.

[1560] Der Königlische Landrat des Kreises Herzogtum Lauenburg, St. Georgsburg B. Ratzeburg (15/11/1919): Schreiben an den Oberpräsidenten in Kiel wegen Sicherung von Heeresgut vor kommunistischen Putschen. (LASH Abt. 301 Nr. 5733).

[1561] Cité dans *Schwendner (2000). A. Lost – König der Kampfstoffe*, *op. cit.*

5.3.2 Le 24 octobre 1919 « *Der schwarze Tag von Münster*[1562] »

Le centre de Breloh comptabilisait, avant octobre 1919, le nombre impressionnant d'un million d'obus chimiques, 230 000 projectiles chimiques d'artillerie de tranchée (*Kampfstoffminen*) représentant une masse totale de 20 000 tonnes. La question de l'élimination de cet arsenal resta en suspens jusqu'à ce qu'un évènement précipita les décisions : l'explosion catastrophique du dépôt du 24 octobre 1919, la plus grosse explosion accidentelle impliquant des toxiques de guerre (cf. Figure 221).

L'incendie d'un train de marchandise à l'arrêt provoqua une explosion extrêmement violente, impliquant un estimatif d'un million d'obus chimiques, 1 000 tonnes de toxiques de guerre, 40 wagons-citernes d'agents chimiques de guerre liquide, 230 000 projectiles de tranchée à chargement chimique et un million d'amorces et de cartouches[1563]. 50 tonnes d'*Ypérite* furent perdues. Restèrent encore en stock quelques 300 tonnes. En novembre 1919 se tint alors à Breloh une réunion sous l'égide du Ministère du Trésor. Fallait-il détruire ou stocker ces matières dangereuses ?

En janvier 1920 se tint une seconde réunion en présence de Fritz Haber relative au devenir des munitions chimiques non transportables. « *Une munition non étanche et non sûre doit être mise au rebut et détruite au plus vite, quant aux points de vue à prendre en compte pour cela, ils sont ceux des personnalités mandatées et en lien avec le Kaiser-Wilhelm-Institut* [1564]». Les destructions de ces munitions chimiques selon ces termes et l'avancée de ces recherches attendirent 1921 avant de se traduire par des faits tangibles sur le plan opérationnel.

Figure 221 : Paysage apocalyptique. Aperçu photographique du site de Breloh après l'explosion catastrophique du 24 octobre 1919[1565].

[1562] La journée noire de Münster.

[1563] Krüger, A. *Der Gasplatz Breloh (1916-1925)* GEKA (Gesellschaft zur Entsorgung von chemische Kampfstoffen und Rüstungsaltlasten mbH. https://www.heidekreis.de/PortalData/2/Resources/verwaltung_und_politik/buergerinformationen/02_GEKA.pdf

[1564] Cité dans Schwendner (2000). *A. Lost – König der Kampfstoffe*, *op. cit.*

[1565] Krüger, A. *Der Gasplatz Breloh (1916-1925, op. cit*.

5.3.3 1920, l'apogée des destructions de munitions en Allemagne

1920 marqua l'apogée de l'activité de démantèlement des munitions anciennes en Allemagne (cf. Figure 222). Le nombre d'ateliers de démolition ne cessa de croître depuis l'entrée en vigueur du contrat *Syndikatsvertrage*. On dénombra en décembre 1920 quelques 64 installations. Cette accentuation des démolitions de munitions en 1920 fut possiblement une conséquence de l'entrée en vigueur du Traité de Versailles en janvier 1920, le non-respect, dès mars 1920, des clauses de ce dernier sur la démilitarisation de l'Allemagne et le possible renforcement du contrôle des opérations par l'IMKK (via la sous-commission militaire interalliée de contrôle dédiée aux armements).

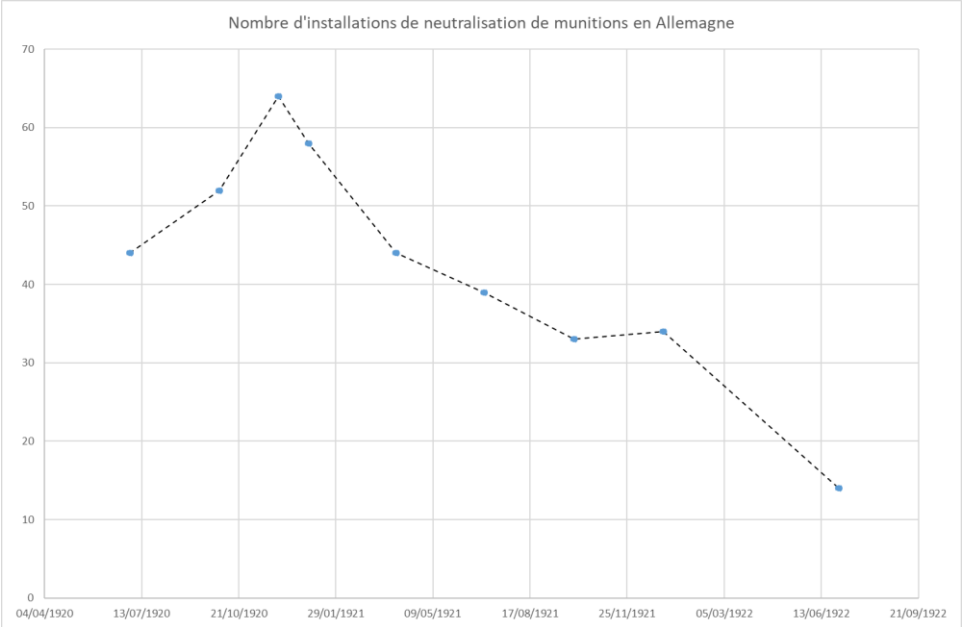


Figure 222 : Evolution du nombre d'installation d'élimination de munition dans l'Allemagne non occupée sous le régime du Syndikatsvertrage[1566].

5.3.4 Liquidation des toxiques de guerre allemands

1921. Incinération de l'Ypérite en vrac

En mai 1921 un contrat fut conclu entre le Ministère du Trésor et le Dr Stolzenberg (entreprise *Kampfmittelverwertung Dr. Hugo Stoltzenberg* qui deviendra par après *Chemische Fabrik Stoltzenberg*, Hamburg) pour la destruction de 385 tonnes de mélange d'*Ypérite* et de tétrachlorure de carbone ou de chlorobenzène (les solvants / fluidisants de l'*Ypérite*). Cette *Ypérite* n'intéressait pas les démolisseurs de munitions car il n'y avait aucun métal et donc aucun profit à en tirer.

Toutefois, les opérations menées par Stoltzenberg précipitèrent la liquidation des stocks résiduels de munitions à *Ypérite*.

[1566] D'après les données extraites de *Schwendner (2000). A. Lost – König der Kampfstoffe, op. cit.*

Une installation de brûlage (four) fut construite à cet effet à Breloh au droit des anciennes installations de remplissage de *Clark* (des obus à *Croix bleue*) (*Clarkwerk*). Cette installation était en mesure de neutraliser à grande échelle les liquides toxiques comme les *Ypérites* fluidisées mais aussi les projectiles chargés au moyen de ces mêmes liquides après retrait du bouchon de l'orifice de remplissage (le personnage à gauche de la photographie Figure 223 ci-contre est en train de sceller le bouchon de cet orifice d'un engin chimique de 150 ou 155 mm à Breloh[1567]). Son exploitation démarra de façon opérationnelle en septembre 1921. Dès lors que des installations et du personnel spécialisé et formé étaient devenus opérationnels à Breloh, le *Reichsschatzministerium* vit la nécessité de rassembler les munitions chimiques de la zone non occupée sur ce site « *Alle mit Kampfstoffe gefüllten Geschosse mit Beschleunigung unbrauchbar zu machen, allerseits anerkannt. Auch wurde die Hinschaffung nach Breloh im allgemeinen für die hierzu zweckmässigste Massnahme erachtet* [1568]»

Figure 223 : Scellement d'un bouchon à l'orifice de remplissage d'un projectile chimique de gros calibre à Breloh.

Facilitation du transport des munitions à Ypérite et rassemblement à Breloh

Des accords furent ensuite passés avec les exploitants des chemins de fer, ce qui facilita les opérations de transport restées malgré tout complexes et énergivores du fait des contraintes (nécessités d'autorisations) imposées par l'IMKK, qui renforça par ailleurs son contrôle et les conditions d'attribution des autorisation suite à une demande du *Reichschatzministerium* d'effectuer ces transports sans autorisations. C'est ainsi que furent transportés entre mars et mai 1922 de grandes quantités de projectiles à *Croix jaune* (à *Ypérite*) depuis le dépôt de Zweedorf à Breloh. Les archives relatant cet épisode sont rares. Elles apportent toutefois quelques précisions concernant les conditions dans lesquelles durent s'effectuer ces transports. Le transport en hiver était recommandé car l'*Ypérite* gelait à 12°C, autorisant son transport sans danger ce qui situe les possibles premiers transports à l'hiver 1921-1922.

Démolition des munitions chimiques fuyardes résiduelles des dépôts vidés

Or à l'hiver 1921-1922, la moitié déjà des installations de démolition de munitions était arrivée en fin d'exploitation. Restaient sur ces sites, les engins fuyards non transportables. En juin 1921, une équipe d'opérateurs spécialisés (possible issue du Dr Stolzenberg) fut mandatée et mobilisée pour rechercher ces munitions et pour les démolir en lieux et place selon des méthodes « adaptées ». Aucune archive n'est disponible permettant d'affirmer que ces opérations aient bel et bien été menées. Mais la présence d'engins chimiques dans les installations de démantèlement de munitions est bien attestée puisque des opérations de destruction visant ces projectiles furent documentées.

[1567] Extrait de Krüger, A. *Der Gasplatz Breloh (1916-1925), op. cit*.

[1568] La nécessité d'accélérer la mise hors d'usage de tous les projectiles chargés avec des toxiques de guerre est reconnue par tous. Ainsi, il a été jugé opportun de les acheminer à Beloh dans ce but.

C'était pour ces entreprises le moyen de faire des gains supplémentaires significatifs et de s'enrichir en récupérant les métaux constitutifs de ces engins.

Les méthodes employées étaient très simples (cf. Figure 224 et Figure 225): (i) les munitions et/ou fragments de munitions étaient déposés au fond d'une fosse spécialement ouverte de 2 à 3 mètres de profondeur (ii) ces fourneaux étaient ensuite pétardés, puis (iii) les projectiles fragmentés étaient ensuite rassemblés, mis en grands tas, pour être brûlés (afin de supprimer les égouttures et de nettoyer les métaux à valeur commerciale). Ces opérations devaient être conduites dans des conditions météorologiques (température, direction et force du vent, précipitations) favorables.

Cette méthode ne répondait pas aux meilleures technologies disponibles du moment (défendues par des organismes centraux comme le *Kaiser-Wilhelm-Institut* de Berlin-Dahlem et la commission de contrôle de l'Artillerie) comme le souligna *Evaporator* AG. Premièrement, l'éclatement des projectiles chimiques en plein-air (*Open Detonation*) (OD) exigeait le recours à d'importantes quantités d'explosifs, les munitions chimiques ne pouvaient détoner efficacement du fait des faibles quantités d'explosifs contenues dans leur chargement. Deuxièmement, l'éclatement par OD favorisait la dissémination dans l'air, les sols, des toxiques de guerre, propre à générer des risques et nuisances graves pour l'environnement et le voisinage. Ainsi le 15 septembre 1920, des riverains furent incommodés suite à une opération d'éclatement et à un changement de la direction des vents. Le 30 avril 1921, ce type d'opération causa le départ d'un incendie de forêt. En octobre 1921 l'Office des Finances du Land de Hanovre se plaignit « *les éclatements journaliers sont en partie ces derniers temps tellement nombreux que les environs sont hautement menacés et que des maladies du bétail et des hommes sont survenues*[1569] ».

Des exigences du Traité de Versailles contournées ou impossibles à appliquer

Les Articles 169 et 171 du Traité de Versailles exigeaient la destruction des toxiques de guerre des munitions chimiques ainsi que la prohibition de l'exploitation des installations industrielles permettant de les produire. Non seulement l'Allemande ne détruisit pas l'intégralité de ses stocks de toxiques de guerre mais n'apporta aucune modification à son outil industriel.

- **L'Ypérite allemande échappant aux destructions ?**

Les opérations de démolition des munitions chimiques s'avérèrent poussives et prirent du retard sur le calendrier initialement pressenti. Les raisons à cela étaient multiples et pas uniquement techniques. Un faisceau d'informations laisse à croire que l'intégralité de l'*Ypérite* ne fut pas neutralisée par l'Allemagne dans l'entre-deux-guerres. Les militaires allemands restèrent persuadés que l'arme chimique allait constituer une arme décisive dans les guerres futures. Le journal *Chemiker-Zeitung* affirma ainsi dès 1919 « *Ohne die Fortschritte der Chemie ist das Heer undenkbar* » (Sans progrès en chimie, la guerre est impensable). Le Dr Soltzenberg était aussi réticent à la neutralisation des toxiques de guerre et chercha à repousser les échéances des destructions. A la mi-octobre 1920, le stock de projectiles de ce type était encore estimé à 4 000 à 5 000 tonnes, un tonnage qui devait être détruit pour juin 1922. Les destructions étaient achevées en décembre 1923 dans 80 % des installations.

[1569] Cité dans *Schwendner (2000). A. Lost – König der Kampfstoffe, op. cit.*

En 1922, un soupçon que les Alliés stockaient de façon illégale des toxiques de guerre sur le terrain d'une entreprise allemande d'élimination d'engins de guerre autorisée par l'IMKK à Hambourg, joua telle une caution pour la position allemande. Le rapport final de l'IMKK du 31 janvier 1927 conclut que, dans le cadre des opérations de démilitarisation de l'Allemagne, seuls 6 038 gallons (environ 27,5 m^3 ou 35 tonnes) de toxiques de guerre liquides auraient été détruits, soit 10 fois moins que le stock d'*Ypérite* initialement recensé à Breloh en 1919.

Les soupçons grandirent à l'égard de l'Allemagne lorsqu'en 1922 et 1923 elle livra à l'Espagne des toxiques de guerre pour appuyer son intervention militaire contre les troupes marocaines et kabyles dans le Rif. Ainsi, une grande quantité de l'*Ypérite* initialement stockées en Allemagne à la fin de la guerre n'aurait pas été détruite mais stockée de façon plus au moins illégale sous couvert de manquements dans les contrôles de l'IMKK.

A Breloh, et jusqu'en 1925, les premières mesures de démolition de munitions chimiques furent menées sous le contrôle de l'IMKK, puis du *Reichstreuhandgesellschaft*, par des entreprises privées françaises (?) et allemandes (comme par exemple *Kampfmittelverwertung Dr. Hugo Stoltzenberg*). L'achèvement des opérations put être acté en 1925. D'autres problématiques ne furent solutionnées que bien plus tard. Les 12 000 obus fuyards, non conformes, enterrés au droit des anciens ateliers de chargement de Berlin-Adlershof ne furent déterrés et neutralisés qu'à la faveur d'opérations de destructions de munitions et de toxiques de guerre de la Seconde Guerre mondiale menées par la DDR (*Deutsche Demokratische Republik*, ex-Allemagne de l'est) en 1953. Les engins (30 000 projectiles chargés de phosgène, d'*Ypérite* et d'arsines) enfouis au droit du site de chargement de Monsingen / Nahe, furent exhumés depuis une fosse en 1962 pour être immergés dans l'Atlantique.

- **La préservation des capacités de production. Les exigences de l'Article 171 du traité de Versailles impossibles à appliquer**

L'Allemagne se préserva de la destruction de l'intégralité de ses toxiques de guerre et de l'outil industriel nécessaire à leur production. Elle joua l'ambivalence inhérente à la nature même de son industrie chimique, permettant de passer, par d'infimes modifications de procédés, de productions pacifiques et utiles en temps de paix à celles des explosifs et/ou agents agressifs de guerre. Les exigences de l'Article 171 du Traité de Versailles sur la liquidation des toxiques de guerre et de leurs moyens de production impliquaient le démantèlement de vastes branches de l'industrie chimique allemande, puissante et exempte de destruction au terme de la guerre, qui était impossible à réaliser et à exiger car ces usines produisaient déjà pendant la guerre des produits chimiques explosifs et des toxiques de guerre qui étaient des intermédiaires de la production civile de colorant et de produits pharmaceutiques. Le démantèlement contraint et forcé de la chimie allemande, l'un des fleurons de l'industrie, aurait exposé les Alliés à une montée en puissance du mécontentement prolétaire et de la sympathie communiste, dans un climat social déjà tendu dans une Allemagne en proie à un chômage endémique. La position des Alliés, exprimée en 1919 était « *Chaque usine chimique doit être regardée comme un arsenal potentiel*[1570] » et force était de constaté « *On est donc en droit de conclure que les dispositions du Traité donnent pas et qu'elles ne pouvaient pas donner de garanties absolument efficaces contre l'emploi des gaz asphyxiants*[1571] ».

[1570] Johnson, Jeffrey Allan; Macleod, Roy (2006). « The War the Victors Lost: The Dilemmas of Chemical Disarmament, 1919–1926 », In *Frontline and Factory: Comparative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914–1924*. Archimedes. Vol. 16. Dordrecht: Springer. p. 221.

[1571] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, côte GR 5 N 266. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie. Note pour l'Etat-Major de l'Armée. Bureau de l'Organisation et de la Mobilisation. Emploi des gaz asphyxiants et des engins qui s'y rapporte. Paris le 10 juillet 1919. Signé : Maurin. Le Général. Directeur de l'Artillerie.

Figure 224 : Préparation d'un fourneau d'éclatement ou d'une tranchée de brûlage de projectiles brisés à Breloh. Possiblement après l'explosion accidentelle du 24 octobre 1919[1572].

Figure 225 : Préparation d'un brûlage en tas de projectiles à Breloh[1573].

[1572] Extrait de *Schwendner (2000). A. Lost – König der Kampfstoffe. LGA-Rundschau, op. cit*.

[1573] *Ibid.*

5.4. LIQUIDATION DES MUNITIONS ET MATERIELS DE GUERRE EN ALLEMAGNE SOUS OCCUPATION AMERICAINE ET BRITANNIQUE

5.4.1 Démolitions civiles allemandes sous contrôle militaire britannique

Les informations collectées dans le cadre de cette recherche concernant les démolitions de munitions, matières et matériels explosibles en Allemagne sous contrôle militaire britannique sont parcellaires et incomplètes.

A l'instar des Américains, l'Armée britannique vendit les munitions de son secteur d'occupation (secteur de Cologne) à des partenaires privés sous contrat, pour être démolies, sous le contrôle militaire britannique. L'autorisation leur avait été accordée de vendre à des fins commerciales certains constituants bien particuliers (acier, fer et nitrate). Un jeu de photographies exceptionnel, conservé à l'*Imperial War Museum* (cf. Figure 226*),* montre ces opérations de destruction exécutées par des civils allemands (femmes et personnes âgées civiles, aidés de prisonniers de guerre et/ou de personnel militaire), sous le contrôle de l'Armée britannique dans la région de Cologne, ainsi que le brûlage à l'air libre (*Open Burning*), par des soldats, de fagots de propulseurs nitrocellulosiques. La ou les entreprises en charge de ces opérations n'ont pas été identifiées dans les archives consultées dans le cadre de cette recherche.

L'Etat-Major américain de la IIIe Armée se rapprocha le 9 avril 1919 de son homologue britannique afin d'être renseigné sur le retour d'expérience britannique en matière d'élimination des engins de guerre (noms et adresses des entreprises, prix pratiqués, etc.) pour ensuite mettre en place une organisation similaire en zone d'occupation américaine.

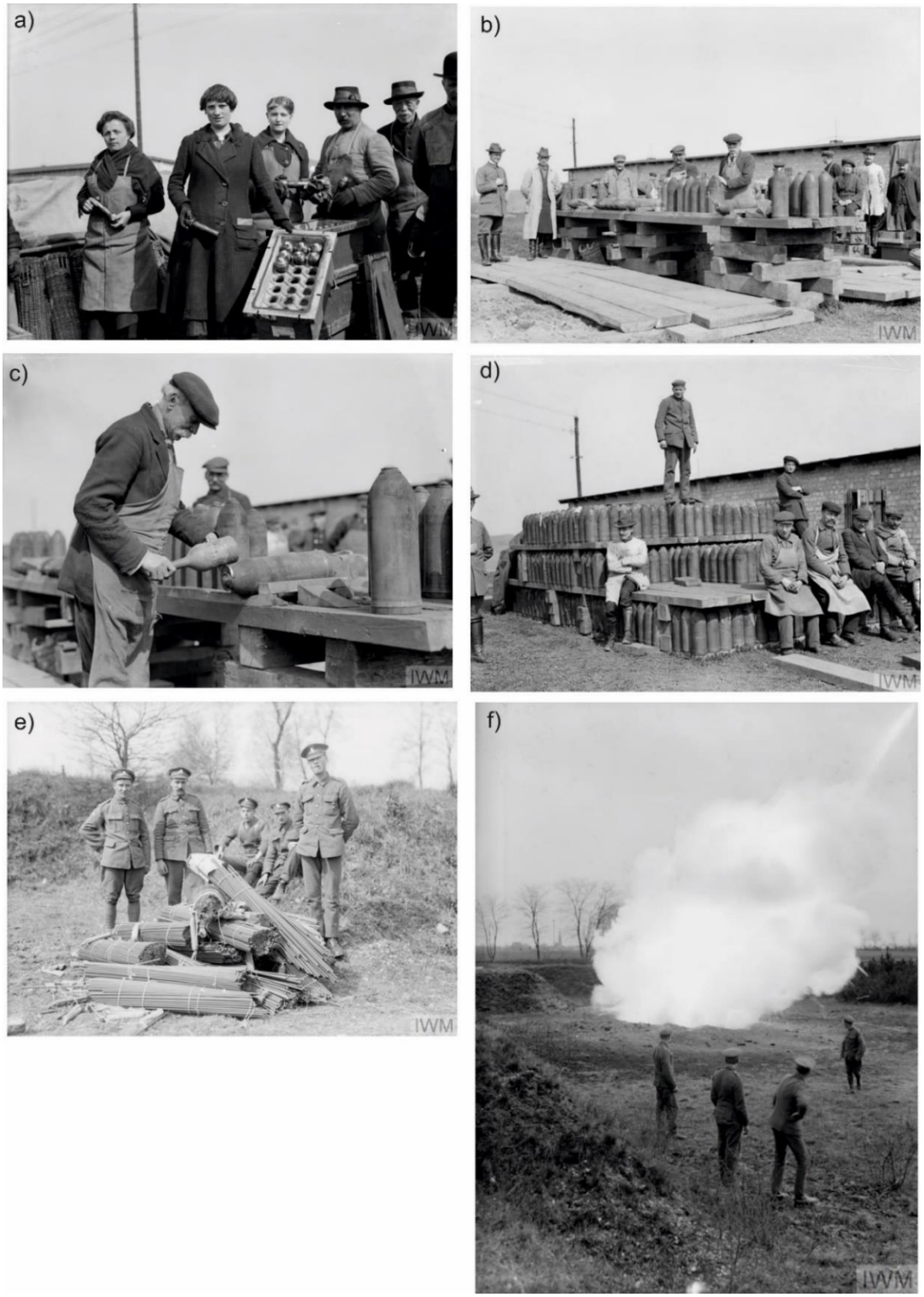


Figure 226 : a) Personnel civil masculin et féminin vraisemblablement en train de reconditionner des fusées dotées de leur gaines d'éclatement, b), c), d) personnel civil et militaire procédant au désamorçage d'obus de gros calibre par dévissage de l'ensemble fusée + gaine, e), f) soldats britanniques procédant au brûlage en plein air (Open Burning, OB) de fagots de propulseurs nitrocellulosiques[1574]. 8 avril 1919.

[1574] A) IWM Q 7518, b) IWM Q 7519, c) IWM Q 7521, d) IWM Q 7522, e) IWM Q 7563, f) IWM Q 7561. Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer).

5.4.2 Désarmement sous contrôle militaire américain

Transfert de munitions de part et d'autre de la frontière

D'importants mouvements de munitions et matériels s'engagèrent dès novembre 1918, de part et d'autre de la frontière, entre les zones occupées en Allemagne et la France. Les troupes d'occupation américaines procédèrent peu après leur entrée en Allemagne à des transferts vers l'Allemagne de munitions depuis leurs grands dépôts de base situés en France.

Le 21 novembre 1918, l'Officier Commandant de la IIIe Armée des USA ordonna que soient livrés au dépôt de Mülheim (*Ammunition Depot 361*) (à proximité de Coblence), depuis le dépôt américain de Montigny (en Meuse), six trains chargés de munitions comprenant chacun plus de 5 000 engins (trains A à F), les trains de A à E étaient chargés d'engins conventionnels, le F d'engins chimiques français. Ce transfert avait comme motif vraisemblable l'armement de l'Artillerie américaine de l'armée d'occupation.

Les troupes d'occupation françaises opérèrent de même, avec l'envoi en Allemagne, pour l'Armée du Rhin, de 25 000 tonnes de munitions, provenant en partie du dépôt mosellans du Bois de l'Hôpital à proximité de Metz. D'importants tonnages de munitions, notamment ex-allemandes, furent également transférées depuis ce même dépôt et celui du camp de Sissonne (département de l'Aisne) vers un centre de rassemblement situé à proximité de Francfort-sur-le-Main, plus tard en 1921, après l'extension de l'occupation par les têtes de pont en rive droite du Rhin d'avril 1920.

Montigny est situé dans le nord du département de la Meuse. L'AEF y installa le plus grand dépôt de rassemblement de munitions en bon état et réutilisables (*Salvage*) collectées dans le secteur de la Ire Armée. Au 10 janvier 1919, il rassemblait 9 169 tonnes de munitions[1575]. Le dépôt de Mülheim fut considérable au regard de l'inventaire des engins de guerre et projectiles y étant entreposés, conservé aux archives nationales à Washington D.C.[1576]. Ces engins étaient d'une très grande diversité tant en calibres, usages (artillerie, armes portatives, etc.) que pour leurs origines (française, allemande, britannique et russe). Le 2 mai 1919, le *Chief Ordnance Officer* du GHQ de la IIIe Armée américaine ordonna que soient transférés à Saint-Loubes (département de la Gironde), 45 wagons chargés de munitions abandonnées ex-allemandes (principalement des munitions explosives de calibre 105 et 155 mm désamorcées et en partie non chargées) depuis le site de Hallschlag (dans l'Eifel). Ces engins étaient destinés à être expédiés outre-Atlantique, aux Etats-Unis, depuis la France à des fins expérimentales sur le site d'A*berdeen Proving Ground*[1577]. Le BOD (*Base Ordnance Dump*) n°5 de Sainte-Loubès (département de la Gironde) réceptionna aussi les munitions allemandes récupérées sur le terrain par l'AEF et en état de fonctionnement, et préalablement désamorcées avant leur expédition[1578]. Il s'agissait de 9 000 tonnes de munitions ex-allemandes de tout type[1579].

[1575] National Archives Washington D.C., number RG-120, NM-91-2010, Box 5. Ammunition Park Sector First Arm.

[1576] National Archives Washington D.C., number RG-120, NM-92-2010, box 5. Inventor Ammunition Depot 361 Mülheim, Germany.

[1577] American Expeditionnary Forces – Headquarter Third Army – Office of Chief Ordnance Officer (02/05/1919). National Archives Washington D.C., number RG-120, cité dans Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

[1578] National Archives, Washington D.C., number RG-120 NM-91-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer, Jean-les-Buzy to Chief Ordnance Officer AEF, Tours.

[1579] Chief Ammunition Officer AEF, Souilly, to Chief Ordnance Officer AEF, december 10th, 1918. Signé : H.H. Stout, Lt. Col. Ord.

Parallèlement, les projectiles d'artillerie de tranchée américains, de confection britannique, *Stokes* de 3 *inch* (pouces) ainsi que les grenades non explosées étaient rassemblés pour être expédiés par camion au terrain (puits) de destruction de Bassenheim à proximité de Coblence en Allemagne[1580]. Deux clichés (cf. Figure 227 et Figure 228), rares, montrent les imposants entonnoirs et fourneaux de pétardement d'Ochtendung exploités sous le contrôle des autorités militaires américaines. Ochtendung est situé à moins de cinq kilomètres de Bassenheim. Ces photographies correspondent vraisemblablement au *Bassenheim demolition pit* mentionné dans les archives de Washington.

Rassemblement des munitions abandonnées sur le site industriel de destruction de Hallschalg

L'organisation du rassemblement des munitions ex-allemandes à livrer aux Alliés en territoire occupé par l'Armée des Etats-Unis (régions de Trèves et de Coblence) fut progressivement mise en place dès le 30 décembre 1918, date à laquelle le président du gouvernement à Trèves proposa au général de brigade de la IIIe Armée américaine, A Smith, stationné à Trèves, que soient rassemblées les munitions abandonnées pendant la retraite des troupes allemandes de l'automne 1918.

L'Armée des Etats-Unis délégua les démolitions de munitions à une entité privée compétente dans le domaine de la neutralisation et du déchargement des munitions de guerre. Ces destructions furent centralisées sur un seul site. Le choix se porta rapidement sur celui exploité par *Espargit Aktiengesellschaft* (AG) à Hallschalg dans le canton de Prüm (Eifel, Rhénanie Westphalie). Comme en zone non occupée, l'Armée allemande, dont les effectifs étaient à réduire, était écartée de ces opérations. Le contrôle des démolitions incombait à l'armée d'occupation.

Les coûts afférents aux opérations de rassemblement étaient à la charge de l'entreprise. Ces dépenses étaient recouvertes en contrepartie par les recettes tirées par la revente des métaux après refonte et des autres matières valorisables et commercialisables[1581].

Le site d'Hallschlag avait été exploité durant la Première Guerre mondiale comme usine de production d'explosif et de chargement de projectiles. A la fin des hostilités étaient encore stockés sur ce site 357 517 projectiles de tous calibres totalisant près de 2 500 tonnes[1582]. A ces munitions s'ajoutèrent près de 100 tonnes de TNT et d'acide picrique en surplus.

Les Américains occupèrent le site d'Hallschlag dès avril 1919 et y installèrent une école technique. L'Etat-Major américain fut alors informé qu'il aurait une forte demande en éléments de munitions ex-allemandes en Allemagne. Le GHQ estima les quantités à détruire sur le territoire occupé par la IIIe Armée des Etats-Unis en date du 17 avril 1919 à 12 640 tonnes[1583].

[1580] National Archives, Washington D.C., RG-120 NM-91-1286, Box n° 1654. Headquarter Third Army AEF, may 16th, 1919. From Chief of Staff, Third Army to Chief Officer Salvage Unit # 301 « Disposition of property ». Signé : Malin Graig.

[1581] National Archives Washington D.C., number RG-120. Der Regierungspräsident in Trier (30/12/1918). Schreiben an Brigade-general Smith in Trier wegen der Beseitigung von Fundmunition im Landkreis Trier. In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op.cit.*

[1582] National Archives Washington D.C., number RG-120. Company « B » - 314th Ammunition Train AEF (24/01/1918). In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op.cit.*

[1583] National Archives Washington D.C., number RG-120. AEF – Headquaters Third Army Office of th Chief Ordnance Officer (17/04/1919). Memorandum über eine Konferenz am 16. April 1919 über die Vernichtung von unbrauchbaren Munitionen.

Figure 227 : Terrain de pétardement d'Ochtendung (Rhénanie-Westphalie). 1919, exploité sous le contrôle militaire de l'AEF. Ce cliché montre la préparation d'un fourneau d'éclatement rassembant plusieurs centaines de projectiles de calibre 140 mm. Les morceaux de bois visibles sur les parois du cratère sont des restes des caisses en bois dans lesquelles ces engins étaient conditionnés. A l'arrière plan, un autre fourneau est en cours de préparation[1584]. Il s'agit possiblement du « Bassenheim Demolition Pit » identifié dans les archives nationales à Washington D.C.

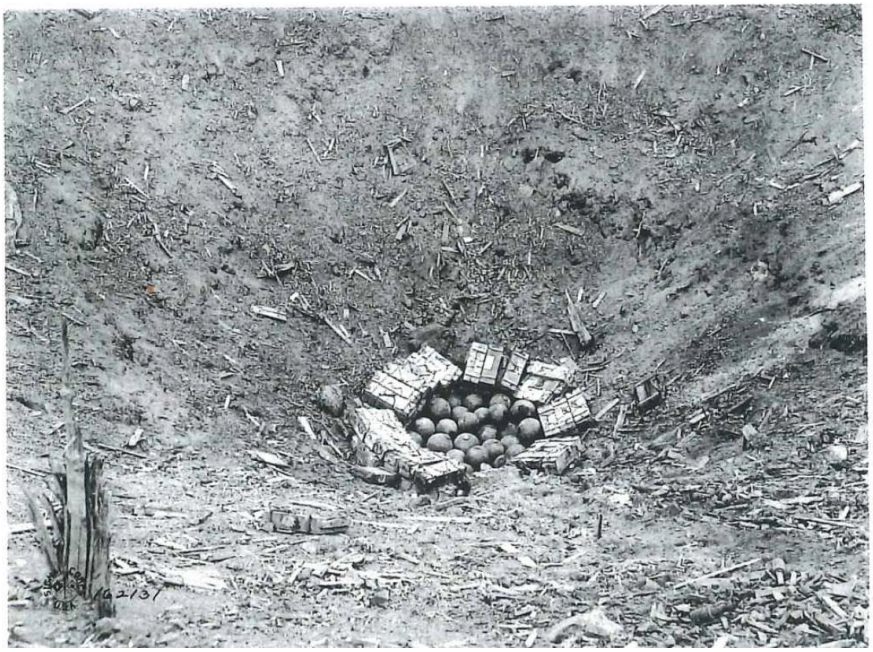


Figure 228 : Ce fourneau à Ochtendung est notamment chargé de bombes sphériques de Zeppelin et de caisses de munitions en bois[1585].

[1584] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*. Mainzer geographische Studien, Heft 45. Geographisches Institut Der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 1999. p.109.

[1585] *Ibid.*

5.4.3 Contractualisation pour la conduite des opérations de destruction de munitions à Hallschalg

Le 4 mai 1919, l'entreprise *Espargit Aktiengesellschaft* (AG), exploitant du site d'Hallschalg, proposa à l'Etat-Major de la IIIe Armée américaine d'acheter l'ensemble des munitions présentes sur le territoire allemand occupé par les Américains et se proposait, sous contrôle américain, de détruire ces matériels dans un délais de 90 jours[1586]. Le 9 mai 1919, le contrat fut conclu entre *Espargit AG* et le Commandement Général de la IIIe Armée. Les projectiles qui n'entrèrent pas dans le cadre de ce contrat devaient être détruits dans les ateliers de déchargement installés par cette IIIème Armée à Mülheim[1587]. Parallèlement à ces opérations industrielles sous contrôle militaire, l'été 1919 fut marqué pour les Américains de l'*American Forces in Germany* par une réduction drastique de ses effectifs : le 19 mai 1919 toutes les divisions américaines combattantes eurent ordre d'être rapatriées, à l'exception de cinq divisions, relevées durant l'été 1919. La IIIe Armée fut dissoute le 2 juillet 1919, réduisant le contingent américain en Allemagne à 6 800 hommes.

Par ailleurs, à la fin mai 1919, *Espargit AG* n'était plus solvable. En conséquence le 10 juin 1919 fut conclu un second et nouveau contrat entre le Commandement Général de la IIIe Armée, *US-Army of Occupation* (signé : J.K. Crain, Colonel, *Coast Artillery Corps, Chief Ordance Officer, Third Army*) et la *Süddeutsche Diskonto Handelsgesellschaft*, de Mannheim, représentée par le Dr. H. Ahrens, pour la dénaturation des engins accumulés à Hallschalg. Les documents consultés ne précisent pas si cette contractualisation fut réalisée au terme d'une procédure de consultation avec mise en concurrence ou en gré à gré. Etaient visés par ce contrat 7 700 tonnes de munitions parmi lesquelles 585 192 obus, de grandes quantités de fusées, des explosifs et grenades à main, 140 000 000 munitions d'armes portatives, entreposées à Hallschlag, Mülheim et Rübenacher Schanze.

A la lecture du contrat, les munitions visées étaient très hétérogènes, tant par leurs calibres que par leurs origines : munitions ex-allemandes mais aussi issues de prises de guerre opérées par l'Armée allemande en temps de guerre (d'origine russe, française, britannique, américaine, austro-hongroise) « *Ont été détruites les munitions d'artillerie allemandes, françaises, anglaises, belges et russes des calibres 75 mm jusqu'à 28 cm*[1588] ». Les Allemands avaient en effet amassé de nombreuses munitions récupérées sur l'ennemi (*Beutemunition*) pendant la guerre et notamment russes après leur victoire de 1917 sur le front de l'est.

Les démolitions devaient être principalement exécutées à Hallschlag à l'exception des fusées et des munitions portatives (à Rübenacker Schanze) et les grenades à main (détruites à Neuwied)[1589]. Le contrat devait arriver à échéance le 20 novembre 1919 (et ainsi respecter le calendrier des réductions des armements en Allemagne imposés par le Traité de Versailles).

Les opérations de rassemblement sur Hallschag se poursuivirent : c'est ainsi que le 20 juillet 1919, on dénombra 795 141 projectiles de tout calibre et de tout état.

[1586] G-4. US-Armee (04/04/1919). National Archives Washington D.C., number RG-120, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 245.

[1587] Assistant Chief of Staff (G-4) – 3. US-Army (12/05/1919). National Archives Washington D.C., number RG-120, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit.* p. 246.

[1588] Headquarter Ordnance Detachment Hallschlag Ammunition Plant (21/07/1919). National Archives Washington D.C., number RG-120, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 255.

[1589] National Archives Washington D.C., number RG-120. American Expeditionary Forces – Headquarter Third Army - Office of Chief Ordnance Officer (10/06/1919). In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 246.

Un troisième contrat fut alors signé entre les Américains et la société *Securitas – Dr. Ahrens* le 6 août 1919 portant alors sur 868 517 engins, parmi lesquels 11 392 munitions chimiques allemandes qui avaient été rassemblées sur ce site pour être démolies, des chiffres qui s'élevèrent à environ 992 000 et 12 452 respectivement. L'entité exploitante destinée à honorer ce contrat prit la raison sociale *Süddeutsche Diskonto*.

En septembre 1919 fut passé le contrat cadre entre le Ministère du Trésor avec un consortium d'entreprises compétentes dans le domaine des munitions (rassemblées en syndicat dénommé *Zerlegungssyndikat*) pour la vente et la démolition des engins présents sur les territoires occupés par les armées alliées en Allemagne. La *Securitas Verwertungsgesellschaft mbH*, Bochum, faisait partie de ce consortium. Les démolitions des grenades à Neuwied furent opérées quant à elles par la *Süddeutsche Diskonto* (qui acheva son exploitation en décembre 1919). L'usine de Hallschlag était en partie alimentée par des livraisons de munitions depuis le grand dépôt de Mülheim. En décembre 1919, 30 wagons de munitions furent expédiés à Hallschlag[1590].

5.4.4 Procédés de destruction et accidents

Les démolitions d'engins chimiques étaient réalisées par brûlage (OB). Profitant de conditions hivernales (vent, neige et froid) favorable à l'atténuation d'émanations gazeuses, une opération de brûlage, fut réalisée le 21 janvier 1920. Elle tourna au fiasco suite à un changement de la direction des vents avec l'intoxication d'habitants du village de Hallschlag.

Un autre accident, une explosion, survint deux jours plus tard, le 23 janvier, lors d'une opération de brûlage de 1 100 projectiles de 155 mm, occasionnant de sévères dégâts aux bâtiments proches voisins au sein de l'usine, mais aussi à l'extérieur. En conséquence, le Tribunal d'Etat ordonna l'interdiction des opérations de brûlage[1591]. Un dépôt de munitions comptabilisant 20 000 obus, 8 000 obus chargés de trinitrophénol et 12 000 projectiles chimique fit accidentellement explosion le 29 mai 1920 projetant une grande partie des engins autour du point de détonation et en enfouissant d'autres sous les décombres.

Les fusées d'artillerie furent démontées puis brûlées, certaines pétardées. Les engins à chargements explosifs étaient déchargés par fusion à la vapeur (*wash-out*) (cf. Section 11h du présent manuscrit). Ces méthodes de démolitions furent décrites assez précisément dans le quatrième rapport du *Chief Ordnance Officer* des troupes américaines d'occupation[1592]. Ces descriptions ont été illustrées par de nombreux schémas manuscrits repris par Preuss, J. Eitelberg, F (1999)[1593]. Fin novembre 1919, la marche des opérations de vidage par fusion à la vapeur et le déceinturage fut sensiblement ralentie par une pénurie en charbon.

[1590] National Archives Washington D.C., number RG-120. Mülheim Ammunition Depot, Mülheim bei Koblenz (02/01/1920) Report of Activities, Month of December 1919, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 265.

[1591] National Archives Washington D.C., number RG-120. Espargit Eifeler Sprengstoffwerke und chemische Fabriken AG. (24/01/1920). Abschrift eines Schreibens der Polizeidienststelle in Stadtkyll betreffend das Ausbrennen von Granaten. In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 267.

[1592] Headquarter Ordnance Detachment Hallschlag Ammunition Plant (23/08/1919). National Archives Washington DC, number RG-120, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. pp. 63-109.

[1593] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Mülheim bei Koblenz (05/01/ol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG, op. cit*.

Ces méthodes sont similaires ou s'apparentes à celles mises en œuvre par les industriels du désobusage en France et en Belgique à compter de 1920. Les archives ne précisent pas si ces procédés étaient déjà connus et maîtrisés par les industriels à Hallschlag où s'ils furent mis en oeuvre sur la base de cahiers de charges imposés par les Alliés.

5.4.5 Mai 1920. Durcissement des positions alliées

Le Traité de Versailles entra en vigueur le 10 janvier 1920, et l'Allemagne devait s'engager (Article 169) à livrer aux Alliés sous deux mois (soit fin mars 1920) les matériels et munitions en excédent des quantités autorisées et démolir dans un délai de trois mois toutes les usines et établissements œuvrant à la production des toxiques de guerre (Article 171). Fin janvier 1920, les transports de munitions vers Hallschlag furent suspendus par l'autorité américaine, afin de contraindre le Dr Ahrend à respecter ses obligations contractuelles, notamment celles portant sur les délais d'exécution des opérations (afin de répondre aux exigences du Traité de Versailles). En février 1920, les Américains poursuivirent la vente de leurs munitions et matériels de guerre stockés à Mülheim et Neuwied aux deux sociétés actives (*Securitas* et *Disconto*)

A la date du 31 mars 1920, l'Allemagne ne respectait déjà plus certains engagements du Traité, notamment celles des clauses militaires (désarmement).

Mars 1920 fut avant tout marqué en Allemagne par de graves tensions politiques internes. Un coup d'état du 13 au 17 mars avorta. A peine la crise fut-elle surmontée qu'éclata dans la Ruhr, en zone démilitarisée, une grève générale suivie d'insurrections. Début avril, l'Armée française répliqua à l'usage par le gouvernement du IIe *Reich* de l'Armée allemande pour réprimer le mouvement insurrectionnel par l'extension de l'occupation en rive droite du Rhin de Francfort-sur-le-Main et Darmstadt[1594]. Le Sénat des Etats-Unis désavoua le président Wilson, en refusant, une seconde fois l'autorisation de ratification du Traité de Versailles le 19 mars 1920. Le 29 mai 1920, à Hallschlag, les installations de vidage par fusion à la vapeur furent ravagées par un incendie suivi par de violentes explosions qui détruisirent presque l'intégralité de l'usine (cf. Figure 229). Des dégâts considérables furent aussi occasionnés aux villages alentours.

Cratère ouvert par l'explosion du 29 mai 1920

Salle des machines après l'incendie du 29 mai 1920

Figure 229 : Vue photographique de l'usine d'Hallschlag après le sinistre du 29 mai 1920[1595].

[1594] Genevey, P. (1967*). « Le désarmement après le traité de Versailles » Politique étrangère,* n°1 - 1967 – 32e année. pp. 87-112.

[1595] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*, *op. cit*, p.361.

Cet accident majeur et ce contexte socio-politique tendu coïncidèrent avec un coup d'arrêt des opérations de démolition de munitions par des entités privées sous contrat et sous contrôle militaire américain. Durant les mois de juin et juillet 1920, quasiment aucune démolition de munitions fut opérée.

Les Américains sommèrent alors les entreprises (par la menace) de hâter les démolitions pour clore leurs contrats, sachant qu'au 30 juin 1920, les deux contrats étaient déjà à 90% de leur avancement. Les Américains semblèrent vouloir prendre le contrôle des munitions résiduelles, les plus compliquées à rebuter, formées en grande majorité par des munitions chimiques[1596]. Les entreprises allemandes se trouvèrent dépossédées des opérations et recettes des démolitions des engins de guerre. Ces entreprises furent ainsi informées par le GHQ de Coblence que les autorités américaines envisageaient de prendre possession de toutes les munitions et éléments de munitions encore présents sur le site de Hallschlag au plus tard le 01 août 1920 et que les démolitions se poursuivraient au moyen de personnel américain et que, une fois ces opérations terminées, l'usine serait cédée à la France et à la Belgique. Le matériel serait quant à lui vendu par les Américains pour recouvrir les coûts de la démolition des munitions[1597].

Les démolitions par les entreprises privées et l'interventionnisme des autorités allemandes furent stoppés. Les tonnages démolis par le personnel américain s'élevaient alors à cette date à 1 000 tonnes contre 18 500 tonnes, toutes munitions confondues, par les entreprises privées. Pour les Américains, il s'agissait d'achever au plus vite les démolitions si possible en maîtrisant et imposant leur calendrier. Au printemps 1920, les Etats-Unis se trouvèrent aussi dans une situation paradoxale, celle d'avoir à appliquer en Allemagne des exigences d'un traité qu'ils refusèrent de ratifier dans un contexte de désengagement progressif des USA des affaires européennes sous la houlettes d'un isolationnisme grandissant. La situation politique américaine et diplomatique européenne précipitèrent probablement la démobilisation des personnels américains encore sous les drapeaux et la conclusion des missions de désarmement qui leur avaient été confiées.

5.4.6 Juillet 1920. Quelles solutions techniques pour hâter les démolitions des engins résiduels, notamment chimiques ?

En juillet 1920 le ton monta entre le Gouvernement allemand et les Alliés lors de la Conférence de Spa « *pour discuter l'application pratique du chapitre des réparations* » (du 5 au 16 juillet 1920) autour des griefs sur les retards pris pour la réduction des effectifs de l'Armée allemande et de l'armement des fortifications. L'IMKK venait aussi de découvrir plusieurs milliers de pièces d'artillerie cachées dans les fortifications.

Les Américains dépêchèrent alors au *Landrat* de Prüm le 27 juillet 1920, que les munitions encore présentes à Hallschlag seraient pétardées en masse dans un délai de deux mois. Un officier de la mission française auprès de l'AEF à Coblence fut prié d'informer la population du projet de pétardement[1598]. Ces démolitions visaient 15 000 obus chimiques français de calibre 75 mm et 7 000 obus explosifs français, anglais et allemands de calibres 75 à 210 mm.

[1596] National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (30/06/1920). Report of activities of Ordnance Services, AFG from 02/07/1919 to 30/06/1920, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*, p. 277.

[1597] National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (03/06 et 08/06/1920). Schreiben an Dr. Ahrens über die Beendigung des Vertrages zur Vernichtung von Munitionen, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*, p. 277.

[1598] National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (27/07/1920). Schreiben an Captain Hendrickx bei der französische Mission in Koblenz wegen der geplanten Munitionsvernichtung in Hallschlag, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*, p. 278.

Elles devaient être placées sous le contrôle et la maîtrise d'œuvre de Julius Schaafhausen de l'entreprise *Sprengstoff- und Abbruch-Arbeiten mbH* de Köln-Westhofen. Mais rapidement, des difficultés techniques et sécuritaires s'imposèrent : les engins chimiques étaient en partie déjà corrodés et avaient perdus leurs marques de peinture distinctives. En conséquence, le chargement réel de ces engins chimiques français de 75 mm ne pouvait plus être connu et aucune mesure de sécurité spécifique à certains agents toxiques de guerre ne pouvait être anticipée.

Les autorités locales de Prüm, le Président gouverneur et l'Inspection du Travail de Trèves s'inquiétèrent des conséquences possibles du pétardement des munitions chimiques pour les personnels de l'usine et la forte densité des populations alentours. Schaafhausen émit aussi alors des réserves quant à la faisabilité de l'opération. Le 19 août 1920, aucune opération de pétardement n'avait encore débuté et les opérations sous les deux contrats *Securitas Dr Ahrens* et *Diskonto* furent poursuivies mais avec une cadence de travail fortement réduite.

Des alternatives furent alors recherchées pour éliminer les munitions chimiques : (i) l'enfouissement, (ii) l'ennoyage en mer ou le pétardement sur un terrain d'exercice de l'Artillerie[1599] ,(iii) l'ennoyage dans le lac volcanique de l'Eifel dénommé *Toten Maar* à proximité de Daun[1600], opération qui nécessitait au préalable l'autorisation du quartier général français, ce site étant localisé en zone occupée française.

Afin de limiter les nuisances occasionnées par les pétardements à Hallschlag et les risques de propagation de nappe de toxiques gazeux, les Américains proposèrent de procéder par l'éclatement successif de fourneaux de faible capacité. L'affaire remonta alors à Berlin (Ministère du Commerce) et à la Commission Militaire de Contrôle Interalliée.

Lorsque le Ministère du Trésor évoqua, lors d'une réunion qui se tint le 28 octobre 1920, que des destructions de munitions chimiques et d'agents toxiques de guerre étaient menées efficacement et en toute sécurité à Breloh (en zone non occupée), l'idée d'y joindre les projectiles chimiques résiduels encore entreposés à Hallschlag vit le jour[1601].

5.4.7 1921-1923. Achèvements des démolitions. Construction et exploitation d'un four

La solution retenue fut *in fine* de construire à Hallschlag un four de brûlage des obus chimiques dotés d'une cheminée suffisamment haute pour s'assurer de la bonne dispersion atmosphérique des fumées. Les brûlages débutèrent après le 24 janvier 1921. *Espargit AG*, toujours propriétaire du site d'Hallschlag informa la Commission interalliée en Rhénanie à Daun, le 12 février 1921, que 2 400 obus avaient déjà été ainsi neutralisés, et qu'une cadence de 400 à 500 unités / jour était envisagée, puis qu'aucune nuisance au voisinage n'avait été constatée[1602].

[1599] Gewerbeaufsichtamt in Trier (19/08/1920) Schreiben an den Regierungspäsident in Trier über die Anordnung des amerikanischen Hauptquartiers zur Sprengung von Gasmunitionen auf dem Gelände der Espargit Sprengstoffwerke in Hallschlag. Land Hauptstaatsarchiv Koblenz, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 279.

[1600] National Archives Washington D.C., number RG-120. Espargit Eifeler Sprengstoffwerke und chemische Fabriken AG (06/10/1920) Schreiben an der Ordnance Department im Hauptquartier der amerikanischen Streitkräfte in Koblenz wegen der beabsichtigten Versenkung von Gasgranate im « Toten Maar » bei Daun, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit.*p. 282.

[1601] Der Reichschatzminister (01/11/1920). Besprechung am 28/10/1920 im Reichschatzministerium III betreffend Gasplatz Breloh unter dem Vorsitz von Ministerialdirektor Kantz. Bundesarchiv, PO 22.01 Nr 3305, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 283.

[1602] Interalliierte Rheinlandkommission in Daun (09/02/1921). Schreiben an die Espargit wegen der Zestörung der Gasgranate. Land Hauptstaatsarchiv Koblenz, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 284.

Les opérations semblent avoir été confiées à l'entreprise *Securitas (Dr Ahrens)* qui aurait détruit en date de février 1921 12 438 engins dont 6 400 munitions chimiques[1603], puis en mars 1921 1 700 engins de 75 mm (dont 800 chimiques)[1604].

Le 30 juin 1921, la *Reichswehr* (l'Armée du Reich*)* était réorganisée, ses effectifs réduits à 100 000 hommes, les organisations paramilitaires dissoutes et une quantité importante d'armement avait été détruite ou livrée. Mais les Alliés n'estimaient pas pouvoir donner quittance à l'Allemagne[1605].

En septembre 1921, les opérations de démolitions arrivèrent à leurs termes**.** Des travaux de finition furent demandés par l'autorité américaine (*60th Ordnance Company*) aux entreprises *Diskonto* et *Dr Ahrens*[1606] : récupération et pétardement des munitions présente dans une mare, neutralisation de toutes les munitions chimiques restantes par un sous-traitant du nom de *Rose*, câffutage des engins vidés. Une inspection du site par l'*Ordnance Officer* le 1er octobre 1921 devait acter la fin des opérations. Les métaux de récupération furent expédiés en septembre 1921 dans des aciéries pour y être fondus (*Gelsenkirchener Mining Co., Gelsenkirchener Bergwerk und Hütten AG Co., Drusker und Co. A Köln-Bickendorf et Aachen West*).

Les opérations à Hallschlag s'achevèrent en décembre 1921. Le dernier inspecteur américain se retira le 15 décembre 1921. Les derniers Américains quittèrent l'Allemagne (et le secteur du fort d'Ehrenbreitstein) le 24 janvier 1923.

5.5. LIQUIDATION DES SURPLUS EN ALLEMAGNE SOUS OCCUPATION FRANÇAISE. UNE HISTOIRE FRANCO-ALLEMANDE.

La priorité fut donnée par les Français occupant leur secteur en Rhénanie de rapatrier leurs munitions encore utilisables[1607].

En juillet 1921 le lieutenant-colonel Chardon, commandant le PAR de Metz et le Ministère de la Guerre trouvèrent une solution pour sortir urgemment le Territoire de Lorraine de l'impasse dans laquelle ils se trouvèrent suite à l'opposition des autorités locales à voir s'installer au plus près du dépôt de rassemblement du Bois de l'Hôpital une usine de démolition de munitions opérées par la Société Lorraine de Produits Industriels (SLPI) (cf. Section 9h)). Les explosions accidentelles de 1921 rappelèrent l'urgence à solutionner cette situation. Il n'y eut pas recours à la réquisition d'office des terrains du Bois de l'Hôpital, qui, sur le plan politique n'aurait qu'envenimé les relations entre autorités centrales parisiennes et locales mosellanes. La SPLI fut alors rendue adjudicatrice d'un nouveau marché signé avec le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks. Ce marché fut approuvé en juin 1921[1608].

[1603] National Archives Washington D.C., number RG-120. Mülheim Ammunition Depot, Mülheim bei Koblenz (28/02/1921). Activity Report, Month February 1921, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 285.

[1604] *Ibid.*

[1605] Genevey, P. (1967) *Le désarmement après le traité de Versailles*, *op. cit* .

[1606] National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office of the Ordnance Officer) (15/09/1921). Schreiben an einen Offizier der 60. Ordnance Company betreffend die Anweisungen zur Erfüllung der Verträge mit Dr Ahrens und des Süddeutschen Diskonto, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 292.

[1607] In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *op. cit*. p. 245.

[1608] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Son objet était la démolition des munitions du Territoire de Lorraine (et en particulier des grands dépôts du Bois de Lorraine et du Bois de l'Hôpital) à Kelsterbach, en Rhénanie (Allemagne occupée) dans une usine existante déjà sous le contrôle de l'Armée du Rhin en zone occupée par les Français « *Cette Usine avait fait ses preuves dans les travaux qu'elle avait effectués au compte de l'Armée du Rhin*[1609] *».* Un dépôt de munitions ex-allemandes était déjà existant à Kelsterbach : une chronique villageoise de 1920, évoque l'existence à cet endroit d'un dépôt de munitions de l'Armée impériale durant la Grande Guerre[1610]. Après la guerre, de grandes quantités de munitions conventionnelles et chimiques (*Croix jaune, bleue* et *verte*) y auraient aussi été entreposées. L'usine était exploitée par la société du nom de *Berlin-Burger Eisenwerke Munitionszerlegung* qui considéra le transport des munitions chimiques sur le centre de rassemblement d'engins non conventionnels de Breloh trop coûteux. Les archives françaises indiquent que l'usine de Kelsterbach fut exploitée par un consortium franco-allemand né de la fusion de la SPLI et de l'entreprise *Rolf* qui travaillait déjà pour le compte de l'Armée du Rhin, à la démolition de munitions dans son usine de Kelsterbach[1611]. Cette nouvelle entité prit possiblement le relai de la *Berlin-Burger Eisenwerke Munitionszerlegung.* « *Le Général Commandant cette Armée a donné pleinement son adhésion pour la continuation des travaux de démolition pour le compte de la Société Lorraine. Lui seul était qualifié pour formuler un avis à ce sujet*[1612] ». Les munitions des dépôts du Territoire de Lorraine furent ainsi désamorcées au Bois de Lorraine et celui de l'Hôpital par la SPLI pour être ensuite chargées et transportées par voie ferrée en toute sécurité jusqu'à Kelsterbach. La Société Alsacienne de Produits Métallurgiques (SAPM) fut « *reconnue légalement comme sous-traitant de la Compagnie Lorraine*[1613] ».

Un flux conséquent de munitions quitta alors le territoire français en direction de l'Allemagne : pour le seul mois de septembre 1921, ce furent 1 502 tonnes et 802 tonnes qui furent évacuées respectivement des dépôts du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine[1614]. Un registre conservé au Service Historique de la Défense[1615] dresse une liste de 399 350 mines explosives légères (*Sprengminen*), 42 668 mines moyennes, 19 421 mines lourdes. La destruction de ces projectiles fut effectuée conformément à des prescriptions du GQG. L'arsenal était complété par 12 770 projectiles à ailettes (*Flugelminen*), 99 565 mines chimiques légères, 609 mines à gaz moyennes, 4500 mines spéciales (*Wurfflaschen*), des engins fumigènes (1727 *Nebeltrommeln*, 1447 *Nebeltöpfe*, 350 *Nebelkasten*), 167 caisses de substitut de paraffine et 80 kilogrammes d'explosifs de type *Nitrolite,* annoté (manuscrit) « *à détruire* ». L'Administration française espérait finaliser les destructions dans l'usine de Kelsterbach pour le printemps 1922[1616].

[1609] Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1. Demande de saisie de cautionnement versé par la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques au titre de la Société Lorraine de Produits Industriels. Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, section Récupération.

[1610] Schwendner, A. (2008, Lost – König der Kampfstoffe, *op. cit.*

[1611] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

[1612] *Ibid.*

[1613] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1, *op. cit.*

[1614] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Metz, le 4 octobre 1921. Le Lieutenant-Colonel, commandant le PAR de Metz. Compte rendu mensuel au sujet de la destruction et de la Récupération de Munitions.

[1615] Service Historique de la Défense, site de Vincennes.

[1616] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Le rapport du 29 octobre 1921 du Commandant Maupoil précisait que le travail de démolition des munitions du territoire de Lorraine par la *Berlin-Burger-Eisenwerck* à Kelsterbach sous contrôle militaire français débuta fin juillet 1921 suivant les termes d'un contrat qui s'acheva en mars 1922[1617].

En date d'octobre 1921, la société avait détruit la moitié du tonnage visés par le contrat. En août et septembre 1921, les démolitions mensuelles s'élevaient à respectivement 2 000 et 2 700 tonnes. Le tonnage visé par les démolitions est incertain.

Il s'élevait à au moins 15 000 tonnes, qui étaient les quantités estimées par le PAR de Metz de munitions ex-allemandes initialement entreposées sur le territoire de Lorraine (auxquels vinrent très vraisemblablement s'ajouter les munitions allemandes stockées par l'armée du *Reich* à Kelsterbach puis celle provenant du dépôt de rassemblement de Sissonne).

Le travail de démolition était lent et poussif à Kelsterbach. Tout ou partie des destructions étaient opérées par pétardement. Le pétardement des engins chimiques nécessitait pour chaque fourneau de les mélanger avec des quantités conséquentes d'engins explosifs conventionnels.

Il fut reproché à la SLPI d'avoir informé que très tardivement le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks qu'elle était en liquidation judiciaire depuis le 1er octobre 1921 et d'avoir adressé dans ce contexte difficile une demande de réduction des prix de son marché du 7 septembre 1920 sans que cette demande ait été sanctionnée par écrit au préalable par le liquidateur. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks prit connaissance de la position de la SPLI via son sous – traitant, la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques (SAPM) début novembre 1921, puis, toujours par l'entremise de la SAPM, que la SPLI avait été déclarée en faillite, le 16 février 1922.

La Commission des marchés du Ministère des Finances, Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks - section Récupération - s'avéra très indulgente et conciliante à l'égard de la SLPI au terme de l'enquête menée sous son égide au printemps 1922.

L'intérêt de l'Etat, comme celui de la SLPI, était conjoint, que les opérations de destruction de munitions du Territoire de Lorraine soient menées à bon terme durant le second semestre 1921 en Allemagne. Aucune irrégularité dans l'exécution du marché ne fut identifiée, tout au plus des négligences « *imputables à l'ignorance des Lois Françaises*[1618] » par la SPLI (dont le siège était à Thionville, département anciennement occupé de la Moselle) peut être plus au fait des lois allemandes perdurant dans le droit local en Moselle au moment de la passation et de l'exécution du marché que celles que l'administration centrale française cherchait à imposer et à appliquer.

[1617] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1, Demande de saisie de cautionnement versé par la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques au titre de la Société Lorraine de Produits Industriels. *op. cit.*

[1618] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1, Demande de saisie de cautionnement versé par la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques au titre de la Société Lorraine de Produits Industriels. Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, section Récupération, *op. cit.*

L'administration semblât devoir justifier en mars 1922 de ses choix d'avoir assoupli la rigueur de ses contrôles des procédures contractuelles à l'égard de la SLPI. Le Territoire de Lorraine n'eut pas à subir les inconvénients inhérents aux destructions de munitions et ainsi « *On ne saurait critiquer l'Administration d'avoir chargé un Usine Allemande du soin de démolir les munitions* », puis « *Il ne faut pas oublier que pour la démolition des munitions, l'Administration cherche moins une opération commerciale avantageuse pour l'Etat, qu'un moyen de se libérer de la lourde charge qui lui incombe de débarrasser les dépôts de produits dangereux pour la sécurité publique*[1619] », cette assertion sonne comme une réponse aux attaques formulées à l'encontre de l'Etat français en Alsace-Lorraine au sujet des opérations de destruction des munitions ex-allemandes par l'opposition politique de gauche, arguant que l'Etat cherche le profit, de se dédouaner de ses responsabilités en les déchargeant sur des entreprises privées au détriment de la sécurité des ouvriers.

En mars 1922, environ 2 000 tonnes de munitions chimiques restaient en souffrance, en attente de destruction, sans opérateur pour les éliminer[1620]. Les archives consultées dans le cadre de cette recherche ne permettent pas d'identifier le devenir de ces projectiles.

L'existence de ce site historique fut redécouverte fortuitement dans les années 1990 à la faveur du chantier d'extension de l'aérodrome Cargo de l'aéroport international de Francfort-sur-le Main (actuel land de Hesse). L'endroit ayant été bombardé durant la Seconde Guerre mondiale, un diagnostic pyrotechnique s'imposait préalablement à l'ouverture du chantier, pour ne pas prendre le risque d'un arrêt prolongé de chantier en cas de découverte fortuite de bombes non explosées. Les explorations géomagnétiques du sol depuis la surface mirent en évidence des anomalies témoignant de la présence sous terre d'objets métalliques.

Quelle ne fut pas la surprise des commanditaires et démineurs, lorsque s'attendant à y trouver des bombes d'aviation de la Seconde Guerre mondiale, ils mirent au jour de grandes quantités de munitions chimiques datant de la Première Guerre mondiale. Elles étaient de surcroit enfouies dans des sols présentant des niveaux de pollution extrêmes en lien avec les engins et toxiques de guerre neutralisés dans l'entre-deux-guerres sur ce site de Kelsterbach.

[1619] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1, Demande de saisie de cautionnement versé par la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques au titre de la Société Lorraine de Produits Industriels. Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, section Récupération, *op. cit.*.

[1620] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1. Courrier de la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques à Monsieur le Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks, Neuilly-sur-Seine, le 23 mats 1922. Signé : le Directeur, J. Blum.

6. Résumé et conclusions de la Section 10h

Parallèlement au nettoyage des anciens champs de bataille, restait en suspens la question des surplus de guerre dont la problématique, débordant le cadre géographique des anciens champs de bataille et de leurs abords, concernait tout le territoire métropolitain dans ses frontières de 1914, mais aussi au-delà, les territoires anciennement annexés d'Alsace-Lorraine, en Allemagne, occupée comme libre et la Grande-Bretagne. Ces surplus étaient ex-allemands, britanniques et français, et d'une grande diversité (projectiles de tous calibres et de tous chargements des dépôts gérés par les armées, munitions, poudres, explosifs et toxiques de guerre des excédents de production sur et/ou à proximité des usines, etc.). La Section 6h du présent manuscrit expose, sur la base des données chiffrées identifiées, les quantités considérables de surplus de guerre et Restes Explosifs de Guerre présents sur les sols français au terme des hostilités.

Le Corps expéditionnaire britannique en France et en Belgique (BEF) avait ainsi accumulé à lui seul des tonnages très élevés de munitions, projectiles en tout genre et matériels dans de vastes dépôts des anciennes zones des armées, en particulier dans le Nord et le Pas-de-Calais, raccordés par un réseau dense et spécialement créé de voies ferrées. Ce tonnage a été estimé aux alentours de 350 000 tonnes. Les surplus américains en France s'élevaient à plus de 250 000 tonnes principalement stockés le long des voies stratégiques reliant les ports de l'Atlantique (Bordeaux, Saint-Nazaire, etc.) à Chaumont (Haute-Marne). Ce que connurent les anglo-saxons en France, les Français le vécurent aussi de l'autre côté des Alpes. Le Corps Expéditionnaire Français en Italie, amena depuis le front et stocka à l'arrière, en Lombardie dans des dépôts dits « de base », des munitions qui devinrent aussi soudainement inutiles.

Les Allemands avaient amassé plusieurs dizaines de milliers de tonnes de projectiles, dont une forte proportion d'engins chimiques, en vastes dépôts, à l'arrière du front de l'est de la France, dans leurs territoires frontières notamment dans les anciens territoires annexés d'Alsace-Lorraine (TAL). Selon les clauses de l'armistice du 11 novembre 1918, ces dépôts furent abandonnés intacts par les Allemands. Les Français prirent donc possession de ces munitions et dépôts ex-allemands à la mi-novembre 1918 en entrant dans le TAL. Puis les armées françaises, britanniques et américaines pénétrèrent en Allemagne fin novembre 1918, occupant chacune un secteur attribué en Rhénanie, en rive gauche du Rhin, pour créer un espace tampon démilitarisé entre l'Allemagne non occupée qui devait payer les réparations de guerre et la France dont la sécurité devait être garantie. Il s'agissait aussi d'exercer une pression politique et militaire sur le gouvernement allemand dans le contexte des négociations des conférences préparatoires au Traité de paix qui fut signé à Versailles le 28 juin 1919 et qui entra en vigueur le 10 janvier 1920. Les clauses militaires de l'armistice (reconduit trois fois par des conventions additionnelles) imposèrent que soient livrés aux Alliés en zones occupées, les munitions et approvisionnements militaires exempts de destruction et que la rive gauche du Rhin soit démilitarisée.

Dans le TAL, en Rhénanie comme ailleurs en France, les Alliés mirent la main sur des matériels et dépôts de munitions ex-allemands délaissés tels quels, intacts. Les matériels et munitions de guerres ex-allemandes, anciennement propriété de l'Etat allemand devinrent des prises et butins de guerre, un acompte aux réparations de guerre. Les Américains vendirent ces matériels à des entreprises privées allemandes pour faire en sorte, que conformément aux accords, ils puissent être neutralisées.

Les clauses du Traité de Versailles étaient plus contraignantes encore pour l'Allemagne puisque les restes de guerre, munitions chimiques, toxiques de guerre rassemblés en 1919 dans des dépôts et usines devaient être livrés et détruits dans des délais de deux à trois mois après l'entrée en vigueur. Il était question de plusieurs millions de projectiles, plusieurs dizaines de milliers de tonnes. Les usines de toxiques de guerre devaient aussi être mise hors capacité de produire. L'IMKK (*Interallierte Militarische Kontrol Kommission*) (Commission Militaire Interalliée de Contrôle, CMIC) et ses trois sous-commissions, furent mises en place en octobre 1919 pour s'assurer, par des contrôles militaires, du bon respect des obligations de désarmement du Traité de Versailles. L'Allemagne qui ne connut ni la guerre ni les destructions sur son sol fut contrainte et forcée de liquider ses surplus de guerre dans le cadre du désarmement du pays imposé par les Alliés via le Traité de Versailles.

En France, Angleterre et en Allemagne, les ministères (Ministère de la Guerre, Ministère des Finances, *Ministry of Munition, Reichschatzministerium*) mandatèrent pour la liquidation des surplus, comme pour le désobusage et la récupération sur les anciens champs de bataille, des entreprises privées réputées compétentes en matière de munitions, par contrat en gré à gré ou après mise en concurrence, via des services et offices spécialement créés pour ces circonstances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, *Disposal Board, Reichsverwertungministerium*). Les munitions étaient cédées aux entreprises afin de les neutraliser puis écoulèrent sur les marchés les matières valorisables provenant des projectiles (acier, laiton, cuivre, zinc, nitrate, etc.) en contrepartie du versement au Trésor de redevances ou plus rarement d'une somme correspondant à la valeur des dépôts (indexées sur les cours des métaux). Ces versements étaient sources de recettes pour l'Etat.

La liquidation des surplus de guerre en Allemagne se distingua de ce qui fut pratiqué en France au même moment, premièrement dans sa finalité, avant tout motivée par des exigences géopolitiques de désarmer l'Allemagne en respectant les clauses du Traité de Versailles et non pour désencombrer les dépôts, usines et protéger les populations. Ensuite, les entreprises exécutantes, isolées en France et en Grande-Bretagne, se regroupèrent en syndicat en Allemagne (une soixantaine d'entités). Enfin, les rebutages des munitions allemandes furent placés sous un contrôle technique direct des armées alliées dans les secteurs sous occupation (française, américaine et britannique selon les secteurs), et via l'IMKK en territoire libre non occupé. A aucun moment du processus de gestion et de destruction des munitions anciennes, l'Armée allemande n'intervint. L'organisation du contrôle et de la « maîtrise d'œuvre » retenue par les Américains dans l'Eifel (dépôts de rassemblement et usine de Hallschlag) et aux alentours de Coblence s'inspira de celle appliquée par les Britanniques dans la région de Cologne.

Les méthodes et moyens de dénaturation des engins de guerre qui furent mis en œuvre en Allemagne étaient similaires à celles et ceux retenus par les industriels du désobusage en France et en Belgique à compter de 1920. Les archives consultées ne précisent pas si ces procédés étaient déjà connus et maitrîsés par les opérateurs allemands ou s'ils émanent de cahiers des charges imposés par les troupes d'occupation.

Les opérations en Allemagne débutèrent dès 1919, par le rassemblement des munitions sur des dépôts et sites industriels bien identifiés, par des entreprises privées et par d'importants mouvements de munitions, visant de forts tonnages, de part et d'autre de la frontière pour doter les armées d'occupation, appuyer les opérations militaires plus à l'est contre la Russie bolchévique, soutenir la Pologne, la Tchécoslovaquie, démolir des munitions ex-allemandes du territoire de Lorraine (par les Français), de Meuse (par les Américains) en Allemagne, ou encore rapatrier aux USA des engins pour des expérimentations.

Les rassemblements entamés dès 1918, se poursuivirent en France en 1919, opérés par l'Armée. Les munitions chimiques françaises excédentaires (environ quatre millions d'engins) furent dirigées sur l'ERGMu de la Ferté Hauterive dans le département de l'Allier, alors qu'en Allemagne non occupée, ces projectiles toxiques convergèrent majoritairement vers le dépôt et le site de chargement de munitions chimiques de Breloh (Münster, Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie), fief de la guerre chimique allemande (centre d'expérimentation de Fritz Haber). Des mouvements de masses considérables de munitions furent aussi opérés en France pour éloigner des stocks dangereux des zones habitées comme dans le grenoblois, suite à une explosion accidentelle catastrophique en 1918.

Au même moment, l'Armée française engagée militairement en Italie ne fut pas en capacité de rapatrier en France les munitions, pétards, signaux et artifices en tout genre, instables, qui furent *in fine* dirigés vers des centres de rassemblement avant d'être détruits par pétardement, en Lombardie en 1919.

A l'instar du Corps expéditionnaire français en Italie, les Britanniques ne jugèrent pas nécessaire de rapatrier outre-manche les 350 000 tonnes d'engins en surplus entreposés dans de vastes dépôts dans le Nord Pas-de-Calais et en Picardie essentiellement; le *Disposal Board* entreprit de les neutraliser sur place en confiant ces stocks à des entreprises privées britanniques (Cohen, Armes George & Cie) qui n'expédièrent en Grande-Bretagne que les matières constitutives des engins, propriété d'Etat, pour y être vendues et réutilisées.

Les liquidations des surplus de guerre ne débutèrent en France comme en Allemagne qu'à compter du dernier trimestre 1919. L'explosion catastrophique du dépôt de Breloh du 24 octobre 1919, la plus grosse explosion accidentelle impliquant des munitions chimiques, réaffirma l'impérieuse nécéssité de liquider ces stocks. Les démolitions s'accélérèrent alors début 1920 en Allemagne libre comme occupée. 1920 marqua l'apogée de l'activité de démantèlement des munitions anciennes. Cette accentuation des démolitions de munitions fut possiblement une conséquence de l'entrée en vigueur du Traité de Versailles le 10 janvier 1920, et le non-respect, dès le 31 mars 1920, des clauses de ce dernier sur la démilitarisation de l'Allemagne se traduisant par un possible renforcement du contrôle des opérations par l'IMKK. Les Alliés hâtèrent aussi possiblement les démolitions en prévision d'une démobilisation rapide des corps expéditionnaires américains et britanniques en Allemagne dans un contexte de très grande agitation politique et sociale du pays. Par ailleurs, le Président démocrate Wilson fut écarté de l'exécutif au profit des Républicains prônant le retour à l'isolationnisme et fut désavoué par le Sénat qui refusa de ratifier le Traité de Versailles. Les Etats-Unis se trouvèrent dans une situation paradoxale, celle d'avoir à s'assurer du respect par l'Allemagne des exigences d'un traité qu'ils n'avaient pas ratifié. Le 29 mai 1920, l'usine de Hallschlag sous contrôle américain explosa occasionnant des dégâts considérables aux villages alentours.

Cet accident et ces contextes socio-politiques allemand et états-unien coïncidèrent avec un coup d'arrêt des opérations de démolition de munitions par des entités privées sous contrat et sous contrôle militaire américain. Il s'agissait d'achever au plus vite les démolitions. Les Américains sommèrent alors les entreprises de hâter (par la menace) les démolitions pour clore leurs contrats. Les opérations à Hallschlag s'achevèrent en décembre 1921. Le dernier inspecteur américain se retira le 15 décembre 1921.

Le dépôt de munitions chimiques de Breloh fut liquidé entre 1921 et 1925 par une entreprise privée (*Kampfmittelverwertung* Dr. Hugo Stolzenberg) sous contrôle de l'IMKK en combinant du pétardement en fosse et le brûlage des fragments résiduels par temps frais.

Mais l''Allemagne se préserva de la destruction de l'intégralité de ses toxiques de guerre et du démantèlement de l'outil industriel nécessaire à leur production, contrairement aux exigences des Articles 168 et 171 du Traité de Versailles.

Des démolitions de munitions et de matières explosibles et agressives furent également opérées par des entreprises allemandes sous contrôle militaire français. Plusieurs dizaines de milliers de tonnes de munitions chimiques et conventionnelles furent transférées du territoire de Lorraine (dépôts du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine en Moselle) à l'été 1921 pour être démolies en secteur français et sous contrôle militaire français dans l'usine de destruction de Kelsterbach, à proximité de Francfort-sur-le-Main (Land de Hesse). Cette usine fut exploitée par un consortium franco-allemand (impliquant la Société Lorraine de Produits Industriels (SPLI) sous contrat avec le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), suite au refus des autorités messines locales d'autoriser l'exploitation de l'usine SPLI initialement projetée au Bois de l'Hôpital, au sud-est de Metz (département de la Moselle). Son exploitation fut à l'origine de pollutions sévères des sols et des eaux souterraines découvertes de façon fortuite vers 1990.

La liquidation des munitions chimiques anciennes, hors service et excédentaires rassemblées et stockées à l'ERGMu de la Ferté-Hauterive ne fut pas hâtée comme à Breloh, la France ne devant répondre à aucune injonction à éliminer au plus vite ces matériels. Elle fut opérée en a minima deux phases au regard des archives consultées (i) par l'industriel Bouxin par un contrat de septembre 1923 avec le Parc d'Artillerie pour le brûlage d'environ 350 000 engins de différents calibres possiblement endommagé consécutivement au sinistre survenu en mai 1922 ayant détruits 280 000 obus chimiques de gros calibres (ii) en 1927 par un Bataillon d'Ouvriers de l'Artillerie (BOA) dans des conditions de travail et de sécurité effroyables, pour neutraliser les engins mais aussi les décharger en vue de les recharger avec des toxiques « frais » (opérations de « *retro-fitting* »). Bouxin, ou un autre industriel du même nom tenta dès 1921, sous contrat, de liquider le stock de bombes de tranchées déplacé depuis le grenoblois à une quarantaine de kilomètres de là, au camp des Burettes ; il stoppa ses activités suite à des accidents mortels survenus fin 1923. Les bombes restèrent ainsi stockées à l'air libre avant que le Ministère de la Guerre prit la décision d'enfouir sur place ces 30 000 projectiles en 1928.

Des excédents de productions industrielles furent aussi éliminés dans l'entre-deux-guerres, usant de pratiques rudimentaires. L'abandon définitif des restes de guerre fut aussi l'option retenue pour environ quatre millions de grenades chloratées, excédents de production, ennoyées dans une ancienne ardoisière à Avrillé (département du Maine-et-Loire). Dans les Alpes, le site industriel de production de sels de (per)chlorate et de fabrication d'explosifs (per)chloratés de Chedde (département de la Haute-Savoie) se débarrassa par noyage en août 1919 d'un reliquat de plus de 4 500 tonnes de perchlorate d'ammonium dans la rivière Arve. En Grande-Bretagne, le *Disposal & Liquidation Commission* procéda à l'élimination par brûlage de poudres (*Cordite*), explosifs (TNT, *Lyddite* (trinitrophénol)) et toxiques de guerre (*Ypérite*) dans six usines implantées à proximité des grands dépôts de poudres et explosifs en Angleterre.

Les années 20 virent aussi l'arrivée sur le théâtre des opérations de la liquidation des surplus de guerre en France et en Belgique d'un acteur majeur : le britannique Francis Norman Pickett.

Francis Norman Pickett (1887-1957) (ci-contre[1621]) était un ingénieur brillant, inventif. Ambitieux, il était aussi doté, comme son père d'un talent d'homme d'affaire. Il créa dans l'immédiate sortie de la Première Guerre mondiale sa propre entreprise, sous la raison sociale « FN Pickett & Fils », de droit français, dont le siège était à Wimereux, dans le département du Pas-de-Calais. F.N. Pickett put bâtir cette entreprise sur des bases financières solides, fort des recettes apportées par l'exploitation exclusive de ses inventions (brevetées) dans le domaine de l'électromécanique.

Entrevoyant dans les centaines de milliers de tonnes de munitions, armes et matériels en tout genre, délaissées lors de la cessation des hostilités par les armées dans le nord de la France et de Belgique, un « gisement » de matières premières secondaires (fer, acier, cuivre, laiton, plomb, zinc, étain, nitrates et explosifs, etc.) dont il pouvait tirer profit, il se lança dans une aventure industrielle inédite, invraisemblable, celle de transformer des « déchets » de guerre en matières premières secondaires valorisables et rémunératrices. Il s'agissait de réinjecter les fruits de l'économie et de l'industrie de guerre dans celles de la reconstruction du temps de paix, « *faire des épées des socs de charrue et des lances des serpes*[1622] » avec le « *Treasure in the War dumps*[1623] ».

Les activités de F.N. Pickett & Fils sont relativement bien documentées et tracées dans les sources archivistiques consultées comparativement à celles d'autres industriels du désobusage et ce pour plusieurs raisons (i) l'exécution de ses contrats, en France comme en Belgique, était contrôlée par les autorités civiles et militaires, générant de nombreux rapports d'avancement et des correspondances administratives, (ii) l'entreprise était en difficulté financière et en litige avec le Trésor britannique ce qui déclencha une enquête par un cabinet d'audit (*Price, Waterhouse & Cie*) sur les causes de cette situation ainsi que des actions en justice et (iii) F.N. Pickett & Fils dut faire face à une campagne de dénigrement par voie de presse et à de nombreuses tribunes dans les quotidiens français de l'entre-deux-guerres dès que des accidents, souvent tragiques, se produisaient dans ses chantiers.

Francis Norman Pickett signa en avril 1920 son premier contrat dénommé « Français » avec le Ministère de la Guerre en gré-à-gré pour l'éradication impérieuse et nécessaire de 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes entreposées en forêt de Trélon (département du nord), sous la pression notamment d'association d'anciens combattants. Il fit là la démonstration de ses savoir-faire.

[1621] *Focus community magazine*. Serving Ilfracombe, Hele, Combe Martin, Woolacombe and the surrounding area, March 2013 - Vol 28 No 3

[1622] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, op. cit.*

[1623] National Archives, Kew Gardens, London, number MUN04 7010. Article de presse britannique, non nommé, non datée.

Le 1er juin 1920, il contractualisa alors avec le *Disposal Board* britannique, avec le « contrat des cylindres » qui prévoyait la vente par le Ministère de la Guerre britannique de tous les cylindres à gaz collectés dans la zone britannique. Puis le 14 juin 1920, après moult négociations, il se rendit propriétaire, après versement comptant de 250 000 livres, pour 2 050 000 livres *Sterling* des quelques 350 000 tonnes de munitions britanniques en surplus entreposées dans le nord de la France.

Son entreprise se dota pour arriver à ses fins d'une organisation très hiérarchique, faite de et pour d'anciens militaires hauts gradés de l'Armée britannique. Il s'adjoignit aussi les services controversés du général Régnier (ancien commandant de l'Artillerie de la 6e Région militaire) au poste d'inspecteur général vers 1921 et de l'officier scientifique artilleur russe Michael Kostevitch afin d'organiser la sécurité et les protocoles de démolition des munitions. Ce personnage rocambolesque, tour à tour espion pour les russes puis pour les Allemands, mais brillantissime penseur des poudres et explosifs, imagina et organisa les procédés de démantèlement des munitions pour optimiser en toute sécurité la récupération des matières, prônant une véritable « Taylorisation », hautement spécialisée et technique de la destruction des engins de guerre. Ses méthodes furent expérimentées et développées dans l'usine *C-Factory* de Trélon, au prix d'accidents, de nuisances et de pollutions que subirent les populations riveraines qui protestèrent face à ces activités de guerre qui leur avaient été imposées par l'Etat sans les concerter.

Il fut rendu adjudicataire des contrats « britanniques » et « belge », prévoyant pour ce dernier l'ouverture de son usine *B-Factory* de Westroozebeke en Flandre occidentale et la neutralisation de 32 000 tonnes d'engins livrés par l'Armée belge en 1921. Puis vinrent, suite aux défaillances des premiers industriels britanniques du *Disposal Board*, les contrats de Conteville et Bourbourg, respectivement dans la Somme et dans le Nord. Au total, Pickett se retrouva avec un portefeuille de plus de 400 000 tonnes à détruire. Il ouvrit pour cela 19 usines, employant plus jusqu'à 4 000 personnes, rassemblant une main d'œuvre très hétéroclite, faite de travailleurs locaux mais aussi immigrés, provenant du Maghreb, des Pays de l'Est et de la Péninsule Ibérique pour compenser les manques de main d'œuvre locale dans la sortie de guerre et celle qui disparaissaient alors, les Prisonniers de Guerre et les travailleurs indochinois. Ses usines étaient placées sous le contrôle technique de l'Artillerie française des Régions militaires concernées. Sa plus grande installation fut celle de Dannes Camiers (Boulonnais, département du Pas-de-Calais), implantée au plus près d'un grand dépôt britannique dans des champs dunaires, et où l'industriel démolis au moins 110 00 tonnes de munitions, profitant et subissant aussi cet environnement pour mener à bien ses opérations. Ce site de désobusage possédait une réelle dimension industrielle.

Mais Pickett fut rapidement confronté, dès l'ouverture de son chantier de Trélon, à des difficultés majeures, en partie partagées avec d'autres industriels du désobusage mais aussi spécifiques à cette entreprise, qui transformèrent peu à peu son ambitieuse aventure industrielle en chemin de croix. Inédites furent pour lui ces opérations, elles l'étaient aussi pour une administration française à repenser, à réorganiser dans le but de faire cette transition inouïe entre une guerre d'une violence jamais vue vers un temps de paix où tout restait à reconstruire. Les exploitations Pickett furent conduites comme pour d'autres industriels du désobusage en France, dans un brouillard administratif, caractérisé par l'absence de cadre réglementant (i) ses activités si spécifiques, temporaires, dangereuses, mais inédites, et (ii) la sécurité interne et externe à ses usines. L'administration tenta d'appliquer à défaut, en vain, sa réglementation du temps ordinaire et, balbutiante, hésitante chercha à trouver des compromis entre le respect de la réglementation et l'intérêt général, celui de voir disparaître dans les meilleurs délais et des conditions de sécurité acceptables les surplus de guerre. Les temporalités des réactions et prises de décision de cette nébuleuse administrative n'étaient pas celles imposées par l'urgence à liquider sur le terrain les surplus de guerre et aux tempos des procédés de destruction.

Pickett fut confronté à d'autres difficultés liées à la typologie des munitions déchargées, et à son statut de plus grande entreprise de direction britannique en France.

Les écueils qu'il eut à surmonter furent d'abord techniques, avec des difficultés de déchargement d'engins allemands de la fin de la guerre aux chargements impurs et de piètre qualité. Les obus chimiques d'une grande diversité et pour certains dépréciés nécessitaient des ajustements techniques permanents. Pickett projeta un temps d'immerger des obus chimiques ex-allemands en mer du Nord, le rebutage de ces engins ayant été jugé trop risqué et insuffisamment rémunérateur, avant de se rétracter suite à de possibles développements de procédés rendant la neutralisation de ces engins enfin profitable.

Pickett eut à subir les différends diplomatiques entre la France et son ancien allié britannique concernant le paiement par l'Allemagne des réparations de guerre. Pickett fut soumis au contrôle de l'Armée française et de l'Armée belge et aux contraintes administratives pour l'exécution de son contrat « belge » (Westroozebeke) et de ses contrats « français » (Trélon, Sissonne, Saint-Erme, « Place à gaz ») tandis que la majorité de ses contrats étaient « britanniques » sur le sol français, soumis à la réglementation française dont le donneur d'ordre était le *Disposal Board* britannique. Cette imbrication d'intérêts français et britanniques par l'entremise de l'entreprise Pickett, acteur majeur de la libération des sols de France des restes de guerre, fut exploitée sur le plan diplomatique par l'Etat français pour tenter de faire plier les Britanniques à ses exigences. Deux embargos imposés par la France sur l'exportation des métaux de récupération qui furent levés après d'âpres négociations empêchèrent Pickett d'écouler sa marchandise sur le marché britannique au moment où les cours des métaux de récupération étaient favorables, cours qui s'effondrèrent avec l'amorce de la crise économique mondiale de la Grande Dépression. Ses livraisons à la Grande Bretagne furent par ailleurs aussi suspendues par la grève des mineurs (paralysant la branche de l'industrie sidérurgique). Pickett n'eut d'autre alternative que d'exploiter son usine de Trélon à perte.

Pickett devint la cible de campagnes de presse violentes à l'encontre de son organisation et de son personnel, attisées par de nombreux incidents et accidents souvent mortels survenus au sein de ses usines qui vinrent entacher l'image de l'industriel qui n'avait pas besoin d'une telle publicité. Ces accidents étaient inévitables vus les importants tonnages d'engins dangereux traités et la difficulté en interne de faire passer des consignes claires et rigoureuses de sécurité vers un personnel hétéroclite, souvent immigré, parlant plus de 10 langues étrangères.

Les conditions de clôture de ses chantiers restent obscures. Trélon fut démantelé par un de ses anciens employé (W. Gilbert en 1924) sous contrat français. Il poursuivit en France par de petits chantiers à Sissonne (entre 1925 et 1926). Puis on retrouve ses traces bien plus tard vers 1926 en Meuse, en forêt de Spincourt, où il détruisit, pour le compte de l'Artillerie de la 6e Région militaire et du Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stock, des obus chimiques ex-allemands (dont une majorité d'engins à *Croix bleue*) par brûlage, vraisemblablement un stocks de plus de 200 000 d'engins laissé là par la vacance d'un autre industriel qui possiblement n'avait pas les moyens techniques de procéder à des neutralisation dont Pickett avait fait la preuve de sa parfaite maîtrise. La question reste posée pourquoi il fut autorisé par contrat à démolir des engins que le général Régnier, contrôleur technique au sein de la maison Pickett, avait rassemblé en forêt de Spincourt en 1919 alors commandant de l'Artillerie de la 6e Région militaire? Le général fit l'objet d'une procedure pénale mais fut sauvé par l'indéfectible soutien de ses anciens compagnons d'arme le protégeant (comme le général Hirschauer). Les résidus de brûlage générés et leurs pollutions associées, visibles, firent connaître ce terrain de brûlage (*Burning Ground*) sous le nom de « Place à gaz ».

L'entreprise F.N. Pickett & Fils fut déclarée en banqueroute le 7 juillet 1932. Cet homme passionné par le sport automobile, de golf et les bergers allemands semblât avoir connu dans son existence postérieurement à son aventure industrielle en France des difficultés personnelles notoires non renseignées dans les documents consultés.

Ces activités de démolition des surplus de la Grande Guerre par centaines de milliers de tonnes (productions excédentaires dans les usines, dépôts de munitions, etc.) prirent dès 1920 des échelles industrielles, tant par les dimensions et tonnages des dépôts à liquider que par les méthodes et moyens mis en œuvre pour y parvenir. Elles furent opérées, comme pour le désobusage et la récupération sur les anciens champs de bataille, par des entreprises privées sous contrat avec des instances étatiques spécialement créées à cet effet, les matériels à rebuter, propriétés d'Etat, étaient cédés aux entrepreneurs après versement au Trésor d'une redevance ou d'une somme indexée sur le cours des métaux et les quantités. Ces surplus étaient prisés des désobuseurs industriels car représentaient de véritables « gisements » de matières premières secondaires valorisables et rémunératrices directement exploitables sans qu'il soit nécessaire de procéder à des opérations de récupération et de rassemblement. Ces dépôts étaient par ailleurs biens desservis par les voies de communication intactes. Ces activités de démolition des surplus de la Grande Guerre par centaines de milliers de tonnes prirent dès 1920 des échelles industrielles, tant par les dimensions et tonnages des dépôts à liquider que par les méthodes et moyens mis en œuvre pour y parvenir. N'étaient démolis dans un but de récupération des matières constitutives des engins de guerre que les matériels pour lesquels les recettes tirées des reventes des matières secondaires excédaient les coûts de déconstruction. Les matériels jugés trop risqués à démonter eu égard aux bénéfices pouvant en découler étaient aussi écartés du processus de récupération. Ces déchets de guerre furent alors définitivement abandonnés par coulage terrestre ou maritime ou encore enfouis. D'autres furent détruits par pétardement. Enfin des munitions jugées en bon état furent aussi réservées pour être directement ré alloties et entreposées dans les dépôts (cf. Figure 230).

Ces opérations suivirent un cheminement sinueux et chaotique, jalonné d'écueils techniques, sécuritaires, organisationnels, inévitables face à la nouveauté et à l'ampleur de la tâche, avec comme parades des d'ajustements techniques et contractuels permanents selon une logique de planification accidentelle, de tâtonnements successifs, de « *trial and error* » expérimentaux, le tout placé sous le sceau de l'urgence.

Les désobuseurs industriels eurent aussi à subir une conjoncture défavorable de l'entre-deux-guerres et notamment la crise économique (effondrement des cours des métaux, grèves et mouvements sociaux). En Allemagne, l'instabilité politique et sociétale du pays, des explosions catastrophiques d'usine de démantèlement de munitions, le non-respect par l'Allemagne début 1920 des exigences du Traité de Versailles en matière de démilitarisation, et les perspectives de départ de Rhénanie des troupes d'occupation britanniques et américaines, hâtèrent les destructions de munitions opérées sous contrôle militaire direct allié ou celui de l'IMKK en zone non occupée.

La grande majorité des surplus fut éradiquée durant la première moitié des années 20. D'autres surplus attendirent les années 50, que des solutions techniques économiquement supportables furent trouvées pour décharger certains obus chimiques de la Grande Guerre.

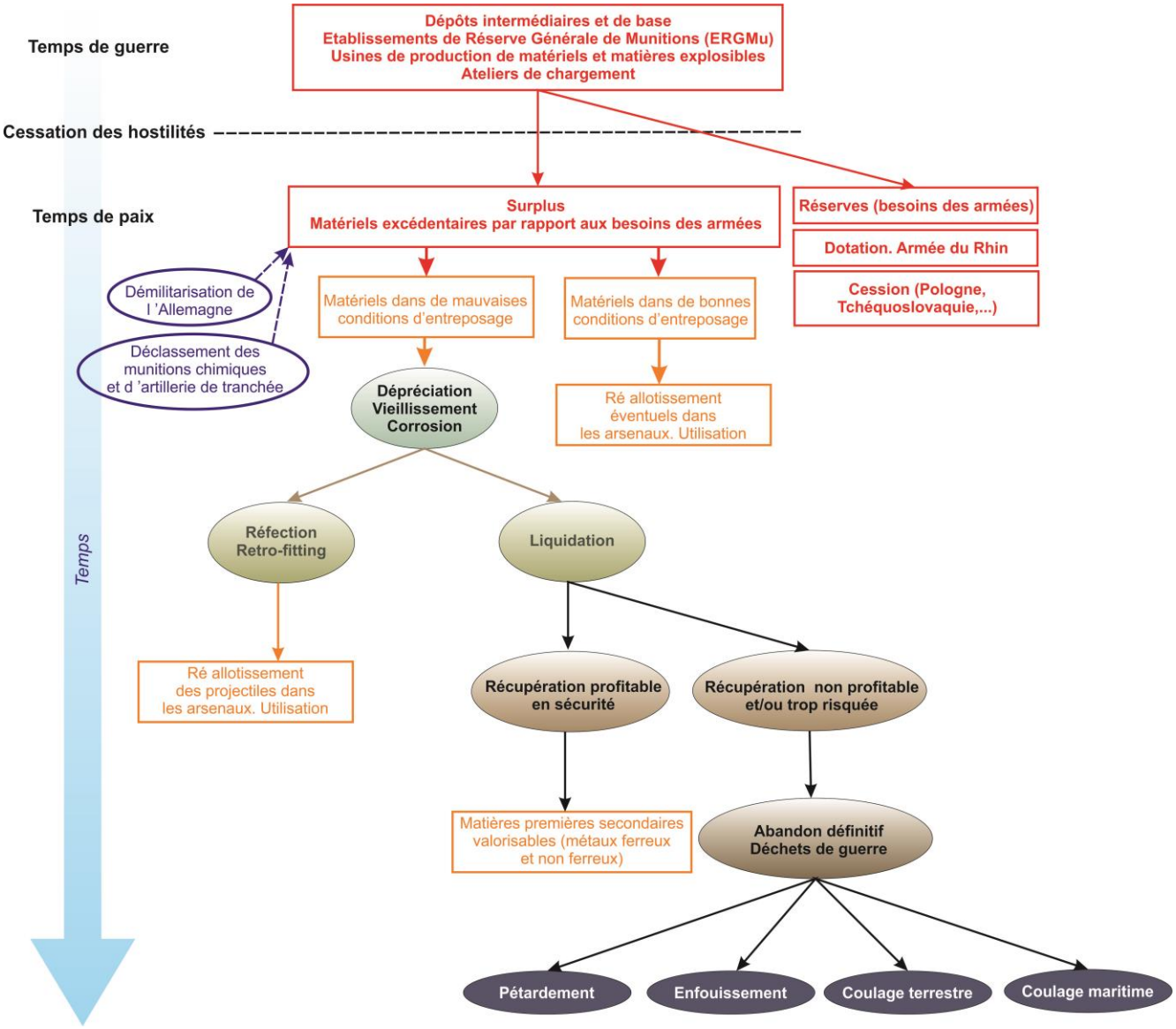


Figure 230 : Devenir des surplus de guerre et des munitions en excès, obsolètes et hors service datant de la Première Guerre mondiale

L'urgence et la nécessité de la liquidation des tonnages considérables de matériels et matières formant les surplus de guerre ainsi que ceux et celles entassés dans les dépôts de rassemblement constitués au terme d'opération de récupération sur les anciennes lignes de fronts et leurs abords, étaient dans la sortie de guerre, totalement inédites et une conséquence directe d'une guerre industrielle de matériel qui vit l'usage d'engins explosifs et toxiques nouveaux, puissants, précis, dans des proportions sans précédents. La Grande Guerre industrielle ne pouvait déboucher que sur une sortie de guerre industrielle. La dénaturation à des fins sécuritaires et profitables de ces quantités Restes Explosifs de Guerre d'une grande diversité nécessita des organisations, méthodes et moyens industriels qu'il fallut inventer dans un temps extrêmement contraint, objets de la Section 11h qui suit.

Section 11h
Déchargement de munitions à des fins de récupération. Organisation, procédés et moyens

1. Introduction de la Section 11h

Nous allons plus particulièrement nous intéresser dans cette section du présent manuscrit, aux procédés, artisanaux, semi-industriels, ou encore industriels, utilisés dans l'entre-deux-guerres pour démolir définitivement ou décharger les munitions de récupération ou en surplus, en considérant, après les opérations préliminaires de tri des matériels, (i) d'une part les procédés conduisant à l'abandon définitif des matières constitutives et (ii) d'autre part, les trains de tâches permettant de transformer les engins de guerre et autres matières explosibles en matières secondaires réutilisables.

La mise en œuvre de ces procédés nécessitait une organisation bien spécifique des chantiers et ateliers de démolition et de déchargement qui s'installèrent là où leurs activités pouvaient être les plus profitables et techniquement réalisables sur les plans sécuritaires et logistiques. Une main d'œuvre était aussi indispensable pour mener à bien ces opérations dans un contexte de pénurie dans une sortie de guerre traumatique et de dépression démographique, notamment parmi la population masculine en puissance de travailler.

Cette analyse historiographique des procédés de démolition et de déchargement des engins de guerre est incontournable car de ces derniers dépendent directement (i) le caractère polluant des opérations, (ii) la nature des composés produits et émis dans ce cadre et (iii) le ou les milieux (sol, eaux souterraines et superficielles, etc.) potentiellement impactés. La recherche historique sur les procédés et les produits utilisés et générés par une activité industrielle est un outil essentiel et incontournable dans tout processus d'évaluation des pollutions industrielles dans la méthodologie nationale en matière de sites et sols pollués (au sens des textes du Ministère en charge de l'environnement d'avril 2017). Il en constitue le socle, les fondations, sur lesquels s'appuient toutes les études, qu'il s'agisse des diagnostics aux évaluations des risques.

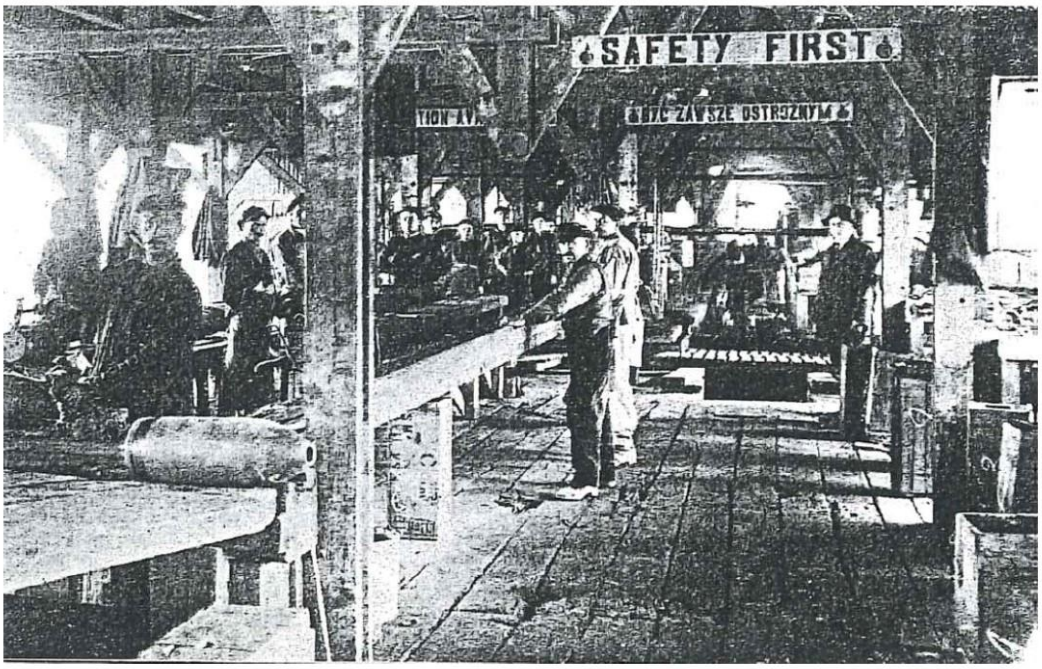
2. Personnels et main-d'œuvre affairés au déchargement et à la démolition des munitions

2.1. UNE MAIN D'ŒUVRE COSMOPILITE.

La main d'œuvre au sein des usines de démolition de munitions était particulièrement cosmopolite. La pénurie en main d'œuvre (après la démobilisation de la main d'œuvre militaire et des PG) qui caractérisait l'immédiate sortie de guerre, forcèrent les industriels du désobusage à faire appel à de la population locale mais surtout à une population de travailleurs immigrés provenant pour l'essentiel de la péninsule ibérique (les usines Clere & Schwander du canton de Spincourt embauchèrent une main d'œuvre portugaise nombreuse), des pays de l'est (Pologne, Tchécoslovaquie, Russie, etc.) et du Maghreb. Des travailleurs indochinois (annamites), déjà employé dans des usines de guerre durant le conflit, étaient aussi actifs dans certaines installations de désobusage.

Une main d'oeuvre féminine était également affairée aux opérations de démolition de munitions (cf. Figure 232). Au regard des archives et clichés historiques collectés dans le cadre de cette recherche, les femmes étaient assignée à certaines tâches bien particulières, non physiques, peu dangereuses mais répétitives, comme le vidage (noyage) des poudres des cartouches d'obus ou d'armes portatives, où la neutralisation des amorces par percussion manuelle. A Trélon, il semble qu'elles aient aussi été employée au désarmorçage de projectiles de petit calibre par dévissage manuel.

M. Kostevitch, l'ingénieur officier russe en charge de l'inspection des usines F.N. Pickett & Fils, souligna dans ses écrits de 1927, le cosmopolitisme (de langues, de cultures) de cette population de travailleurs « *This really very hard and tedious labour, was rendered still more difficult, owing to the fact, that the workmen (and women) at the Factories were often a real « Agglomeration » of many nationalities, the number of which was sometimes not less than twelwe* », poursuivant en pointant les conséquences sécuritaires d'une telle disparité de langues « *What effort I had to make on my side, in order that a Moroccan (for instance) should understand clearly what he had to do in such and such case : what was really dangerous and what consequences could follow from an infraction of discipline* ». Comment en effet s'assurer dans ces conditions de barrières des langues de la passation de consignes de sécurités, individuelles, collectives, claires et précises ? Chez Pickett, direction et contremaitres étaient britanniques, les Français de l'Artillerie assuraient aussi un contrôle technique des opérations exécutées par une main d'œuvre étrangère disparate. Le cliché de la Figure 231, pris vers 1921 dans l'unité de déchargement par fusion de la *J-Factory* à Zeneghem (département du Pas-de-Calais) illustre bien la volonté de la direction de Pickett de se faire comprendre par les travailleurs des diverses nationalités par un jeu d'écriteaux dans leurs langues respectives.



« J-Factory » Zeneghem, Pas-de-Calais

Washing-out plant.

Figure 231 : Atelier de déchargement par fusion des obus explosifs de la J-Factory à Zeneghem (département du Pas-de-Calais) vers 1921. A noter les écriteaux rappelant les consignes de sécurité en anglais et langues étrangères[1624].

[1624] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, op. cit.* p. 96.

Les archives collectées dans le cadre de cette recherche montrent que du personnel encadré par l'Artillerie (Bataillon d'Ouvriers de l'Artillerie (BOA)), ainsi que des repris de justice (placés pour mesures disciplinaires) furent aussi employés au rebutage de munitions anciennes dans certains ERGMu (exemple de la Ferté Hauterive, en 1927[1625]).

Figure 232 : Une femme affairée à percuter manuellement des amorces. Usine F.N. Pickett & Fils de Moliens (département de l'Oise) [1626]

[1625] Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité* du 6 mai 1932 *« Alerte aux gaz ! L'Ypérite ».*

[1626] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*, p. 83.

2.2. DES COMMUNAUTES DE TRAVAILLEURS QUI AVAIENT MAUVAISE PRESSE

Les colonnes de la presse des années 20 décrivent des communautés d'ouvriers, principalement formées d'étrangers, traversées par de l'indiscipline, la violence et l'insubordination, faute de pouvoir de police, instillant auprès des populations qui étaient amenées à les côtoyer un climat d'insécurité.

Le recours illicite aux armes pour des règlements de compte, les agressions, les états d'ébriétés sur la place publique, étaient nombreux et fréquents au regard de la presse des années 20. Le maire de Sissonne, par exemple, dans le département de l'Aisne, semblât être dépassé par l'afflux des travailleurs immigrés vers l'usine de démolition (F.N. Pickett & Fils) de Jeoffrécourt et son cortège de violences.

> *Sissonne. - Entre Polonais. - Cherchant de l'embauche le Polonais Sovonsky, 29 ans, maçon s'était rendu à l'usine de Jeoffrécourt, mais vu son état d'ébriété, on n'avait pas jugé nécessaire de l'occuper. Rencontrant là ses compatriotes, Sovonsky envoya chercher trois litres de cognac qui furent absorbés, puis comme il avait encore soif, trois autres litres furent encore dégustés. On pense dans quel état se trouvait Sovonsky, qui, d'ailleurs dit ne plus se souvenir de rien. Mais, au cours de sa « cuite », Sovonsky eut une discussion avec un de ses compatriotes, à qui il porta un coup de couteau sur la tête, puis l'ayant projeté à terre, lui porta un coup de talon sur la mâchoire le mettant dans un piteux état. Sovonsky, qui avait pris la fuite, a été appréhendé et mis eu état d'arrestation[1627].*
>
> *Sissonne. Saoul comme un Polonais. Deux chinois rentraient le 13 mars vers 12 heures, lorsqu'à proximité du Camp, un polonais, se trouvant en état d'ivresse, se jeta sur eux et leur porta plusieurs coups de poing et de tête dans la poitrine. Ils allaient porter plainte aussitôt à la gendarmerie[1628].*
>
> « *[…] M. le Maire attire l'attention du Conseil Municipal sur l'accroissement continuel d'ouvriers étrangers sur le territoire communal qui lui apporte de grands soucis et l'établissement de formalités obligatoires en vue des cartes d'identités qui occasionne un travail considérable pour lequel la mairie manque de personnels, de police principalement* ». « *Par les temps que nous traversons, il semble que nous ne devons pas réclamer une diminution de précautions, bien au contraire et surtout au moment où les crimes et les attentats augmentent d'une façon si importante du fait des étrangers*[1629] ».

D'autres faits divers furent aussi relatés dans la presse meusienne, concernant le chantier de désobusage de Spincourt (Clere & Schwander).

> *Spincourt. — Homicide volontaire. — Une affaire de meurtre, qui a causé une émotion considérable à Spincourt et aux environs, s'est déroulée à Spincourt. À la suite d'une rixe survenue à la cantine Dutilleux, entre Algériens, l'un deux reçu au côté gauche du bas-ventre un coup de couteau, à la suite duquel il tomba mort ; le couteau avait coupé une grosse veine et une hémorragie foudroyante s'était produite instantanément[1630].*

[1627] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon. *Les Tablettes de l'Aisne*. 24 décembre 1922.

[1628] Archives départementales de l'Aisne, site de Laon. *Les Tablettes de l'Aisne* du 27 mars 1921.

[1629] Mars 1922. *Mesures d'ordre divers à prendre vis-à-vis de l'usine de démolition de munitions du Camp de Sissonne (ferme de Jeoffrécourt). Extrait du registre des délibérations de Sissonne*, pages 357 à 359. Communication personnelle.

[1630] Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 5 mars 1922.

> *Spincourt. — Menaces et coups de feu. — Informés téléphoniquement que des menaces étaient faites contre un chef d'équipe de l'entreprise Clèse [sic] et Schwander, usine de déchargement d'obus, la gendarmerie se rendit à Spincourt, où elle reçut une plainte de Monsieur Deschamps Louis, chef d'équipe. Il déclara qu'il avait été menacé par Emback Ali, 27 ans, marocain, parce qu'il l'avait changé de poste. Il avait sorti un revolver et l'avait braqué sur lui. Un autre jour, dans une cantine, où ils se trouvaient tous deux, Emback avait à nouveau sorti son revolver et avait tiré un coup de feu. Il a été arrêté par les gendarmes et conduit à Montmédy*[1631].

La Gendarmerie procéda aussi dans certains cas à des reconductions à la frontière.

En Allemagne aussi, les usines de démolition de munitions employèrent une main d'œuvre hétéroclite, marquée par la présence d'étrangers provenant notamment des pays de l'est, de la Russie, qui avaient mauvaise presse. Si effectivement, la presse souligna en France les intentions délictuelles de ces travailleurs, en Allemagne les faits et gestes qui leur étaient reprochés étaient politiques. A Zweedorf, la main d'œuvre comprenait environ 150 travailleurs communistes de l'Union des Travailleurs, considérés comme des agitateurs aux intentions terroristes et d'intimidation dans le contexte d'insécurité et insurrectionnel de l'Allemagne des années 20. Les directions des usines redoutaient un *putsch* par ces communistes.

Ces agissements contribuèrent vraisemblablement à approfondir encore ce fossé entre la vie des camps de désobusage et celle d'une société civile de sinistrés et déplacés qui mettait au ban de ses représentations ces activités visant des objets hérités de la guerre, à reléguer au passé, dans un temps de paix dorénavant à pacifier.

2.3. BILAN HUMAIN

Des négligences dans le strict respect des consignes de sécurité, souvent associées à une méconnaissance des effets réels des explosifs et toxiques de guerre par les personnels en charge du démontage des munitions furent des sources de très nombreux incidents et accidents souvent létaux. Les barrières linguistiques entre les contremaitres, les inspecteurs et contrôleurs en charge de la sécurité et le personnel opérant les démolitions, très hétéroclite, issue de plus d'une dizaine de nationalités, formait un terreau favorable aux défauts de communication et donc aux situations accidentogènes. A cela s'ajoutaient des procédés de démontage des engins de guerre dangereux, une course à la rentabilité privilégiant les cadences de travail au respect des consignes de sécurité, puis le recours à des pratiques irresponsables dans le cadre de récupérations illicites. Puis enfin, la malchance s'invita aussi, inévitablement, compte tenu des tonnages très importants d'engins qui furent rebutés.

Nombreux sont les articles de la presse de l'entre-deux-guerres décrivant dans les rubriques « faits divers » les accidents corporels liés aux explosions accidentelles, intoxications et autres brûlures diverses au contact des agents toxiques de guerre.

Aucune statistique officielle centralisant le nombre d'incidents et d'accidents n'a été identifié dans les fonds d'archives consultées. Au même titre que pour le dénombrement des quantités démolies, les données chiffrées concernant le nombre de morts, blessés, mutilés et intoxiques, lorsqu'elles existent, restent parcellaires, locales et/ou chronologiquement bornées à de courts intervalles de temps. Cette dissémination de l'information est vraisemblablement en lien avec l'absence de centralisation de la gestion du désobusage, piloté à l'échelle de chacune des régions militaires concernées.

[1631] Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 5 mars 1922.

Les données chiffrées identifiées dans le cadre de cette recherche ne font pas la distinction entre les victimes liées aux opérations de récupération et de désobusage sur les anciennes lignes de front et celles consécutives à la liquidation des surplus de guerre. Les opérations de désobusage sur la ligne de front causèrent officiellement, entre le 1er juin 1921 et le 1er novembre 1921, soit en seulement cinq mois, 95 morts et 190 blessés[1632]. Le désobusage et la récupération d'engins de guerre et de ferraille en Meuse couta, entre 1919 et 1929, la vie à 127 personnes, en blessant par ailleurs 294 autres[1633]. Dans l'Aisne, en date de 1920, 35 artificiers avaient été tués[1634]. En Alsace, sur la période d'avril 1921 à juillet 1921, 17 ouvriers civils et un artificier militaire furent tués et 13 ouvriers civils blessés dans l'exécution de leur mission de désobusage[1635]. Le personnel artificier du Pas-de-Calais comptait, « *au début de 1922, 83 tués et 203 blessés. […] Depuis 1922, aucun accident grave n'est survenu dans le personnel du Service de désobusage attaché au Département du Pas-de-Calais*[1636] ».

Au regard de ces chiffres, plusieurs centaines de personnes affairées au désobusage et à la liquidation des surplus de guerre auraient perdu la vie dans le cadre de leurs missions. Le nombre de blessés étant certainement au moins trois fois plus élevé. Le nombre de victimes des récupérations et désobusage licites, officiels, voire illicites, est vraisemblablement considérable mais ce bilan macabre est (i) à relativiser car peu important au regard des tonnages démolis[1637] et (ii) possiblement sans aucune commune mesure avec celui, hypothétique, uchronique, du nombre de vie que ces sacrifices surent préserver. « *Le Journal* » du 22 août 1929 évoqua « *L'héroïsme des services de désobusage de la zone rouge*[1638] » relatant « *la multiplicité, la complexité et la dangerosité de leur mission et exaltant leur abnégation et leur sens du devoir jusqu'au sacrifice ultime*[1639] ». A titre de comparaison, entre 1944 et 1950, 2 882 accidents causèrent le décès de 471 démineurs, 1 709 PG, et en blessant respectivement 738 et 2 988.

[1632] Capitaine Mougin, (1923). *De l'instruction sur les munitions dans les corps de troupe, Revue d'Artillerie*, mai 1923.

[1633] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 N 82.

[1634] Saint, L. (1920). *La Reconstitution de l'Aisne, exposé présenté au conseil général*, imprimerie Berger-Levrault, Nancy, Paris, Strasbourg, 1920.

[1635] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402.

[1636] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. p. 489.

[1637] Si on considère un total de 1 000 tués et 2 000 000 de tonnes de munitions neutralisées, il y eut en moyenne un mort pour 2 000 tonnes détruites.

[1638] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. *op. cit.*

[1639] Extrait du manuscrit de doctorat, Colonel Lion. Communication personnelle.

3. Localisation et organisation des centres de déchargement et d'élimination d'engins de guerre

3.1. CRITERES MOTIVANT LE CHOIX DES IMPLANTATIONS DES CENTRES DE DESTRUCTION

3.1.1 S'installer au plus près des dépôts à liquider bien desservis

La grande majorité des centres de neutralisation de munitions ne fut pas installée au droit des anciens champs de bataille (pourtant gisements des ferrailles abandonnées), les zones de destruction héritées de la guerre (*zone rouge*). Les voies de communication (voies de chemin de fer, routes, canaux) nécessaires à la livraison des munitions et à l'expédition des matières de récupération y étaient détruites. La majorité des chantiers s'ouvrirent aux marges des anciens champs de bataille, dans les anciennes zones des armées et des étapes et aussi dans les grands dépôts (surplus) des *hinterlands*.

L'emplacement des usines de démolition était avant tout imposé par la position des dépôts de munitions à démolir et celles des voies de communication pour la logistique (transport des engins et des produits issus de leur démolition). Les tonnages étaient tels que les distances et transports, manipulations de ces matériels dangereux devaient être réduits au strict minimum, pour des raisons sécuritaires, mais aussi économiques et logistiques.

A Spincourt, centre de rassemblement avec trois vastes dépôts de munitions ex-allemandes, le complexe de désobusage Clere & Schwander s'organisa en exploitant les anciennes de voies de communication laissées par les Allemands, reliant les dépôts entre eux, aux gares de triage et aux batteries ayant pilonnés depuis la Woëvre les positions françaises des Haut-de-Meuse durant le conflit.

En Belgique, c'est à contrario l'intensité des destructions sur l'ancien front qui semblât contraindre la localisation de l'implantation de l'usine *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Poelkapellen / Westroozebeke (Flandre occidentale). Elle fut installée et érigée *ex-nihilo* dans un des secteurs de l'ancien front occidental le plus désolé de par l'intensité des destructions, dans le « Bois de Houthulst » entièrement déchiqueté, a environ 12 kilomètres au nord-est d'Ypres. Pickett s'implanta en plein *no man's land* car le sol y avait été jugé trop pauvre pour la remise en culture[1640]. Pickett dut d'abord surmonter une première difficulté liée à la topographie bouleversée par les cratères d'impacts et tranchées, imposant des vitesses de circulation de 3 à 5 km.h$^{-1,}$ avant de pouvoir construire les routes d'accès nécessaires à son usine[1641].

Ce principe d'établir les ateliers de destruction des REG à proximité des dépôts à liquider était supportable par les industriels lorsque ces dépôts renfermaient des tonnages élevés de projectiles, plusieurs dizaines de milliers de tonnes. Par contre, il devint contreproductif et rédhibitoire lorsque, comme dans la 20e Région militaire, les dépôts étaient nombreux, dispersés de faible tonnage.

[1640] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*, p. 62.

[1641] *Ibid.* p.63.

Dans de tels cas de figure, le rassemblement des dépôts sur un nombre le plus restreint possible de centres de destruction fut si possible privilégié (sites Aigret & Saurons de la Meurthe-et-Moselle[1642]) pour que les opérations soient financièrement supportables par l'Etat et les exécutants.

3.1.2 Distances de sécurité à respecter

D'autres considérations contraignirent aussi la localisation des terrains de destruction. Des clauses contractuelles prévoyaient des distances de sécurité (sur la base de ce qui est qualifié réglementairement aujourd'hui de « zone d'effet » des projectiles les plus puissants[1643]) entre les ateliers de démolition et d'une part le dépôt de munitions le plus proche et d'autre par les lieux habités. Ainsi selon l'Article 8 du contrat du 17 septembre 1919 pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt « *Ce chantier sera une distance suffisante des dépôts pour que l'onde explosive ne puisse influencer celui-ci en cas d'accident. Les chantiers de démolition devront se trouver à une distance minimale de 1 500 mètres des lieux habités*[1644] ». Pourtant, l'usine de Muzeray fut érigée, à l'emplacement du dépôt de munitions et de matériels ex-allemands, à 400 m environ de la ferme de Rampont, et celle de Noire-Fontaine à 1 200 du village de Spincourt, malgré l'opposition ferme du conseil municipal[1645].

3.1.3 Un environnement subi par les industriels

Les implantations des camps de désobusage ne furent pas conditionnées par des critères environnementaux, mais logistiques et d'accessibilité aux dépôts à liquider. Les conditions environnementales dans lesquels les opérations de désobusage devaient s'effectuer étaient aussi *de facto* imposées aux industriels démolisseurs qui eurent alors parfois à subir l'environnement comme à Trélon (installation de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils en environnement forestier (cf. Section 10h du présent manuscrit)) ou Dannes Camier (installation de la *D-Factory* de F.N. Pickett & Fils dans un champ dunaire mouvant (cf. Section 10h du présent manuscrit)) concourant à entraver la bonne marche des opérations.

3.1.4 Critères motivant le choix des emplacements des terrains d'explosion. Rappels

La destruction des REG par pétardement (*Open Detonation*), une solution d'élimination des REG majoritairement mise en œuvre durant la guerre et 1918-1919 par les artilleurs et leurs aides civils, fut poursuivie dans les années 20 par les industriels de la déconstruction des engins de guerre mais lorsqu'aucune autre solution de récupération des matières constitutives des engins, techniquement réalisable dans des conditions de sécurité acceptables, et surtout profitables, fut trouvée. On rappelle ici que les centres de destruction par pétardement, encore désignés par « terrains d'explosion », furent positionnés selon d'autres critères que les centres de rebutage par déchargement.

[1642] Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote 4317-1, B 30035. Examen des projets de contrats pour la destruction des munitions des dépôts français de la 6e Région. 1er avril 1921 n°313 (manuscrit). Signé : Lepelletier.

[1643] Il s'agit de la zone de propagation des éclats suite à la détonation des obus explosifs de plus gros calibre présent dans un dépôt.

[1644] Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote 43 25. Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt, *op. cit.*

[1645] Archives Municipales de Muzeray. Mairie de Muzeray. Séance extraordinaire du 2 juin 1920. Protestation contre l'établissement d'une usine à Muzeray pour le démontage des obus toxiques et explosifs.

Prévalaient dans ces choix (i) l'éloignement des zones habitées, (ii) la présence de dépressions, talus, fossés, carrières permettant de limiter la propagation des éclats, de l'onde de choc et du son des détonations, (iii) la présence de cratères d'impacts (faits de guerre) permettant d'imputer les coûts de remise en état des sols au titre du dédommagement de guerre. Ces dispositions concernaient les REG qui pouvaient être transportés. Les populations eurent à subir les nuisances et les dégâts de ces détonations lorsqu'elles visaient des REG intransportables et détruits sur place sans déplacements et manipulations excessives.

3.2. DES INSTALLATIONS TEMPORAIRES ERIGEES EN URGENCE EX-NIHILO

Ces usines ou ateliers de neutralisation de munitions furent érigés *ex-nihilo*. Ces activités de désobusage industriel étaient exceptionnelles, temporaires et les installations étaient conçues pour ne pas durer. Baraquements, hangars, ateliers étaient faits en bois, avec aussi des matériaux de récupération comme des rails, tôles cintrées récupérées des « cagnât », des caisses de munitions lestées de sable, etc. (cf. Figure 233 et Figure 234). Des baraquements avaient aussi été installés pour accueillir une partie des travailleurs. Au regard des archives et clichés historiques collectés dans le cadre de cette recherche, seule l'usine *D-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Dannes Camiers, semblât prendre des dimensions réellement industrielles, pour pouvoir démolir un tonnage considérable de munitions en tout genre de 110 000 tonnes (cf. Figure 235 et Figure 236) soit un tiers environ du tonnage considérable dont Pickett s'était rendu acquéreur en 1920.

Le photographe John Salvage se rendit à Dannes en 1921 et prit une série de clichés qui, avec ceux du *New York Times* de 1935, sont les seuls reportages photo journalistiques identifiés à ce stade des recherches montrant les opérations et installations de désobusage industriel de l'entre-deux-guerres.

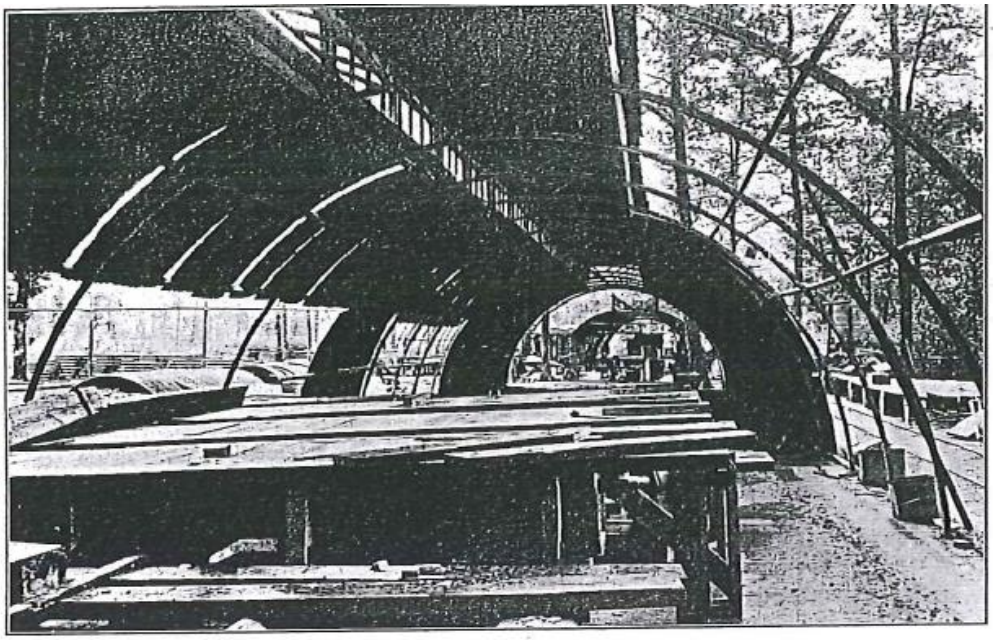


Figure 233 : Installations en tôle cintrée à l'usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (département du Nord)[1646].

[1646] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*, p.69.

Figure 234: Vue générale des baraquements provisoires en bois des personnels employés à l'usine J-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils à Zeneghem (département du Pas-de-Calais)[1647].

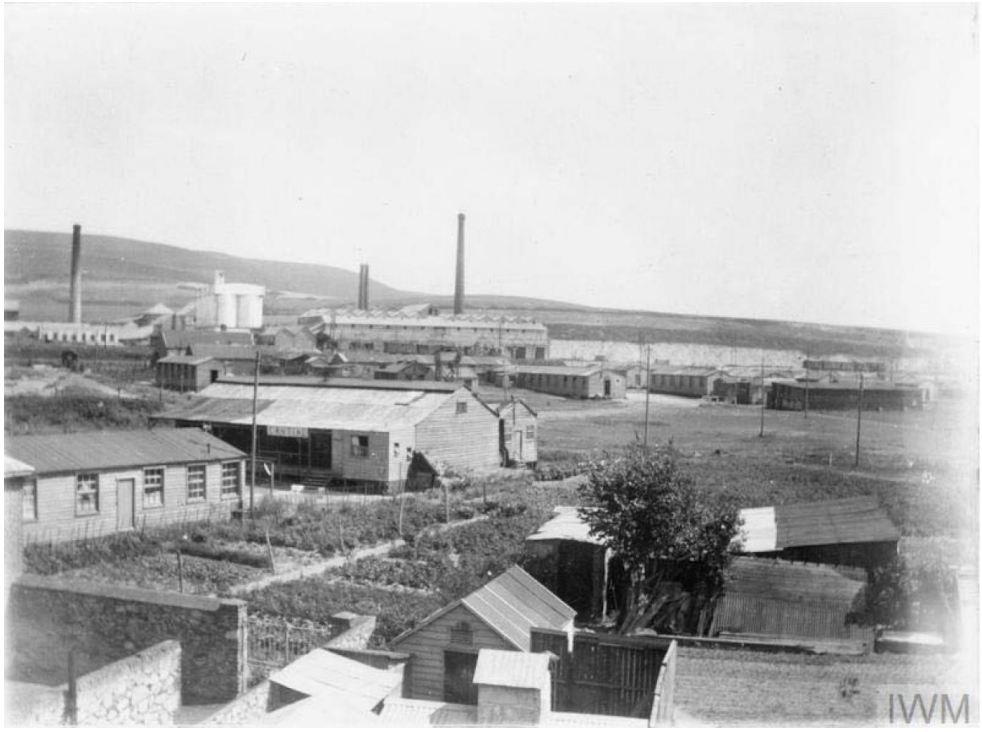


Figure 235 : Vue générale de l'usine D-Factory de la firme F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais) avec au premier plan potagers et baraquements devant possiblement accueillir des travailleurs. A l'arrière-plan des installations industrielles dont il ne subsiste aucune trace actuellement[1648].

[1647] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *« F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit.*, p. 94.

[1648] Imperial War Museum, John Savage collection, number Q113255.

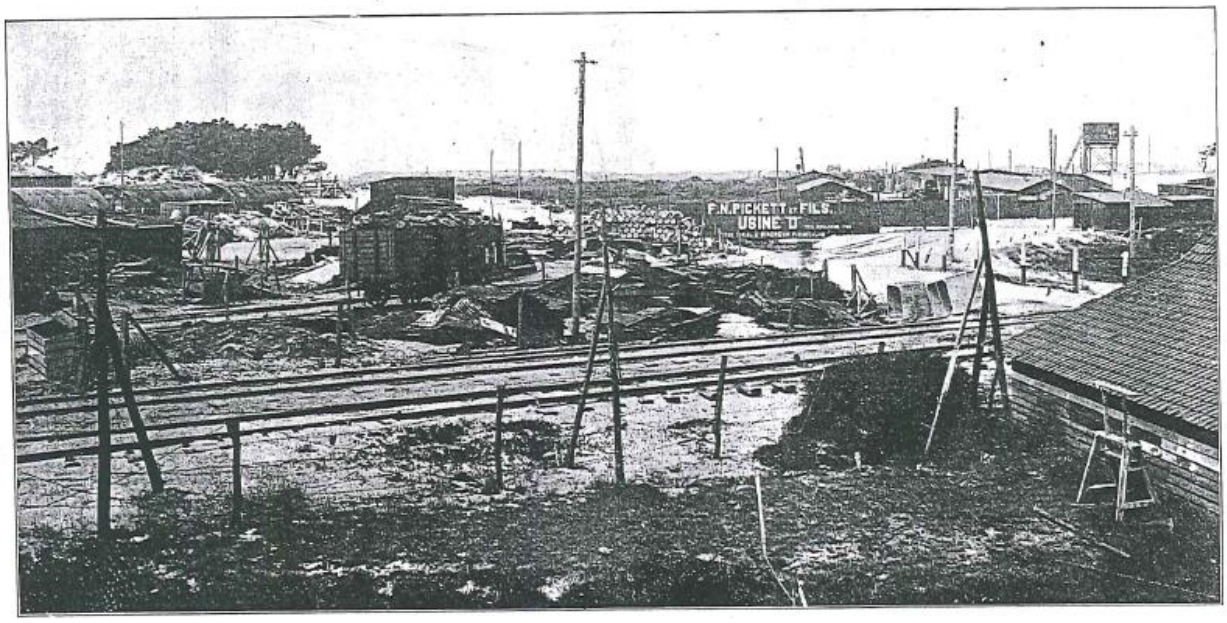


Figure 236 : Vue de l'usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais)[1649].

4. Méthodes et moyens de déchargement des Restes Explosifs de Guerre à des fins de récupération

4.1. TRI ET INSPECTION PREALABLE DES ENGINS DANS LES DEPOTS ET CENTRES DE RASSEMBLEMENT

Un premier tri fut opéré par les artilleurs au moment et sur les lieux de la découverte des Restes Explosifs de Guerre, qu'il s'agisse d'engins dispersés et épars, en amas ou organisés en dépôts. Seules étaient dirigées vers les centres de rassemblement et/ou les centres de destruction, les munitions jugées transportables dans de bonnes conditions de sécurité. Ceux intransportables étaient détruits au plus près des lieux de découverte, généralement par pétardement, ou abandonnés par enfouissement ou coulage.

Un second tri fut ensuite réalisé dans les centres de rassemblement selon divers critères. Les engins étaient inspectés, si possible identifiés (aisément si le marquage distinctif à la peinture était encore présent), puis triés (selon leurs calibres, chargements, typologies, etc.) selon (i) leur potentialité à être réutilisés tel quel ou après réfection par l'Armée française, (ii) leur dangerosité par rapport aux perspectives d'un démontage efficace, profitable, à des fins commerciales. Ces inspections préliminaires étaient aussi essentielles et incontournables afin d'identifier les meilleures alternatives techniques permettant de rebuter les engins de guerre en toute sécurité et de manière la plus profitable possible. Les munitions étaient démolies, selon une doctrine prônée par Michael Kostevitch. Pour lui, les munitions et matières explosibles ne devaient en aucun cas être mélangés mais dissociés et stockés à part selon leurs spécificités.

[1649] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives* », *op. cit*, p. 76.

De là, leur neutralisation et leur déchargement allaient suivre des trajectoires qui leur étaient propres « *Les démolitions seront effectuées par catégories, pour autant que la chose sera possible, d'après les signes extérieurs portés sur chaque type d'obus de manière à ne pas mélanger des produits qui pourraient donner lieu à une réaction violente* [1650]». Les photographies de la Figure 237 page suivante montrent un tel stockage à l'usine Savot Frères & Cie à proximité de Coucy-le-Château (département de l'Aisne), vers 1935. Les munitions étaient stockées par catégories dans des alvéoles spécifiques et séparées. Au premier plan, une alvéole dédiée aux projectiles empennés à ailettes 58T « Crapouillot » est parfaitement visible, alors qu'un manœuvre déplace un charriot sur voie étroite Decauville chargé uniquement d'obus allemands de calibre 77 mm long.

Certaines munitions en bon état, jugées réutilisables, furent réservées pour un réallotissement dans des dépôts réglementaires de l'Artillerie. Il s'agissait en particulier de munitions françaises. Des munitions ex-allemandes échappèrent aux destructions sur le Territoire d'Alsace-Lorraine afin de pouvoir approvisionner les pièces d'artillerie de fortification ex-allemandes des places fortes autour de Metz et de Strasbourg notamment (cf. Section 9h du présent manuscrit).

Les engins considérés comme clairement douteux ou considérés comme trop risqués à décharger par rapport aux bénéfices que les démonteurs pouvaient espérer en tirer, étaient réservés dans l'attente de leur destruction ou de leur abandon ultérieur. Ces déchets de guerre non rémunérateurs étaient écartés du processus de la récupération pour être définitivement abandonnés soit par immersion ou ennoiement terrestre, soit encore par enfouissement ou détruits par pétardement dans des terrains d'explosion tels que ceux ayant déjà fonctionné durant la Grande Guerre.

[1650] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 4317-1, B 30035. Règles techniques- Article 18 du contrat Aigret & Sauron pour la démolition des munitions entreposées au Camp de Chalons 6e Région militaire du 30 octobre 1920.

Figure 237 : Acheminement, rassemblement et stockage temporaire des munitions anciennes dans le centre de désobusage Savot Frères & Cie à Coucy-le-Château (département de l'Aisne). Vers 1935[1651].

[1651] The National Archives, Washington D.C., number RG 306-NT, box 367, *op. cit.*

4.2. DESTRUCTION DES REG INDEMONTABLES PAR OPEN DETONATION

Nous avons vu dans ce qui précède que le pétardement ou l'éclatement volontaire par détonation sympathique (*Open Detonation*) avait été pratiqué par les personnels de l'Artillerie et du Génie, français, alliés, comme allemands durant la guerre pour liquider des engins jugés dangereux et intransportables. Des protocoles de destruction avaient été établis et diffusés dans les armées par des notes et instructions officielles pour cadrer ces neutralisations pratiquées massivement en tas (fourneaux) ou sur des engins dispersés épars, qu'il s'agisse d'engins explosifs, à balles ou chimiques. Le pétardement fut toujours pratiqué dans les années 20 mais uniquement sur des matériels, rassemblés dans des centres de récupération, jugés indémontables et/ou qui ne pouvaient être déchargés par ailleurs (par brûlage, fusion à l'eau chaude, etc.) dans de bonnes conditions de sécurité et donc non profitables. La méthode fut appliquée à des engins explosifs dont les détonateurs ne pouvaient plus être retiré en toute sécurité. Des récupérateurs de ferrailles inertes s'appliquèrent alors, après détonation, à rechercher et ramasser, dans et aux abords des entonnoirs des terrains d'explosion, les éclats issus de ces démolitions dans le cadre de leur contrat.

Dans l'usine de production puis de destruction de munition d'Hallschag (cf. Section 10h du présent manuscrit), un puits de détonation circulaire de 3,5 m de profondeur, recouvert par une couverture d'un mètre de terre, avait été installé et exploités pour détruire les fusées de gros calibre, les gaines d'éclatement et les projectiles dont les fusées-détonateurs ne pouvaient pas être retirés[1652]. Les parois de ce puits étaient constituées d'un empilement de rondins de bois d'un mètre de longueur, afin d'amortir les ondes de choc générées par les détonations.

4.3. ETAPES DU DEMONTAGE ET DU DECHARGEMENT DES MUNITIONS (RECUPERATION DES MATIERES VALORISABLES)

4.3.1 Règles générales et organisation des installations

Le pétardement en fourneaux permettait de neutraliser les engins mais se traduisait par un faible taux de récupération des métaux et une perte sèche des matières valorisables des chargements (comme certains explosifs de bonne qualité, le nitrate d'ammonium, etc.).On constate qu'à partir de 1920, des méthodes de neutralisation des engins de guerre par démontage et déchargement furent développées et appliquées afin d'optimiser en toute sécurité la récupération des matières premières secondaires valorisables constitutives des engins de guerre. L'historique du développement de ces méthodes de récupération n'est pas connu au regard des archives rassemblées dans le cadre de cette recherche. On rappelle toutefois que des méthodes de démontage partiel des coups complets étaient connues des artilleurs britanniques car ils les mirent en application pour neutraliser 40 000 obus à détruire à Wanquetin en 1917[1653].

[1652] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*, *op. cit.* p.79.

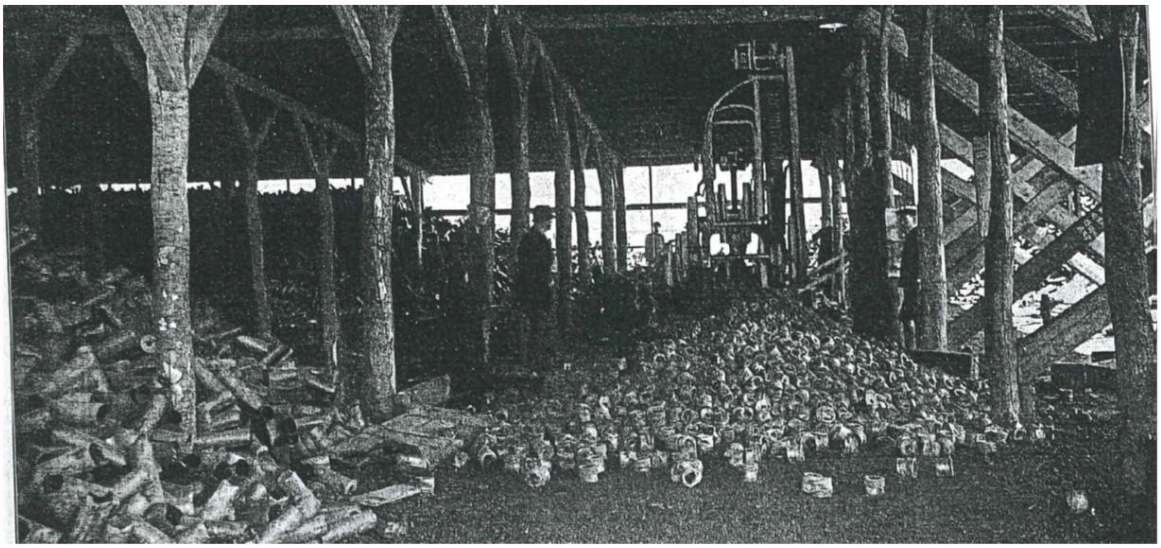
[1653] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre. Renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques. Le Lieutenant-colonel d'artillerie. 10 août 1917. Signé : illisible.

Le travail dans les usines de déchargement des REG était en principe organisé d'après les règles et procédures en vigueur dans les Etablissements pyrotechniques en s'assurant (i) de la séparation des ateliers, d'une construction et facture adaptées aux opérations qu'ils accueillaient, (ii) de la réduction au minimum des matières dangereuses en cours traitement (iii) de l'absence de rassemblement du personnel en un même point, (iiii) de la protection contre la foudre, l'incendie, les variations atmosphériques, etc.[1654]. Cette organisation du travail conditionnait la configuration des chantiers de destruction, alors formés par un ensemble d'ateliers (isolés pour des raisons de sécurité) spécifiquement dédiés à une tache unitaire dans la chaîne allant de la munition à la ferraille de récupération (cf. Figure 240). Les entreprises rendues adjudicataires des marchés de démolition de munitions étaient libres d'employer pour ces destructions et le déchargement tout procédé qu'elles avaient étudié, mais après les avoir fait agréer, au point de vue de la sécurité, par l'autorité militaire. Le démontage et le déchargement des munitions suivaient un train de tâches qui sont décrites dans ce qui suit. Les différentes étapes et leur enchaînement sont présentés et résumés synthétiquement sur la Figure 239.

4.3.2 Dessertissage des étuis et vidage des poudres propulsives

La séparation des projectiles des cartouches par dessertissage (« désencartouchage ») était la première étape du démontage des coups complets (projectiles solidaires de leur cartouche). Pour cela les coups complets étaient enserrés dans un étau, dont les mâchoires maintenaient le projectile, un coup de maillet (en bronze ou en bois) sur la cartouche (douille) en laiton permettait de la désolidariser du projectile. A Moliens *(F-Factory*), la désolidarisation de la cartouche du projectile (des coups complets de *Shrapnels*) était mécanique. La poudre propulsive qu'elle contenait était généralement vidée dans des bassines d'eau ou tonneaux d'eau, dont le contenu, régulièrement vidé, était brûlé sur des aires ou dans des tranchées de brûlage. Cette opération était clairement présentée dans les archives militaires comme l'une des étape préliminaire à la récupération des matériels récupérables par les Britanniques avant le pétardement sous terres des projectiles irrécupérables à Wanquetin. Ensuite, après avoir retiré puis percuté manuellement par un marteau et un poinçon l'amorce de fulminate de mercure, les cartouches en laiton étaient, chez F.N. Pickett & Fils, écrasées (par un pilon) pour limiter leur encombrement durant leur transport (cf. Figure 238 et l'exemple de la *F-Factory* de Moliens Abancourt dans le département de l'Oise).

[1654] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 4317-1, B 30035. Article 18 du contrat Aigret & Sauron pour la démolition des munitiions entreprosées au Camp de Châlons 6e Région militaire du 30 octobre 1920.



« F-Factory » Moliens / Abancourt, Oise

Cartridges crushing plant

Figure 238 : Compactage par écrasseent sous pilon des cartouches en laiton. Usine F.N. Pickett & Fils F-Factory de Moliens Abancourt (département de l'Oise)[1655]..

[1655] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair*. « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, op. cit. p. 85.

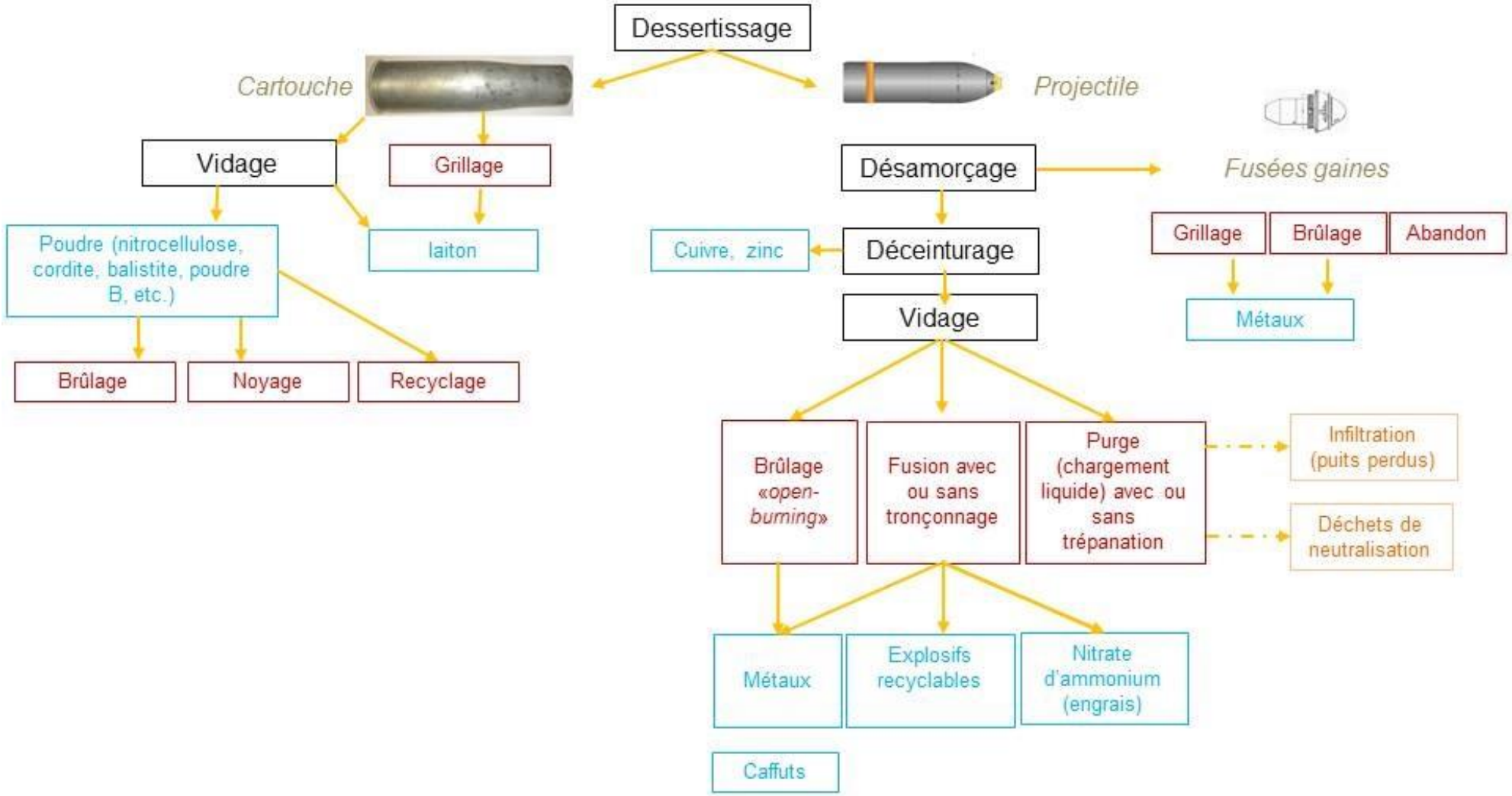


Figure 239 : Enchaînement de tâches pour le vidage et la destruction de projectiles à chargement explosif[1656].

[1656] Hubé, D. (2016).

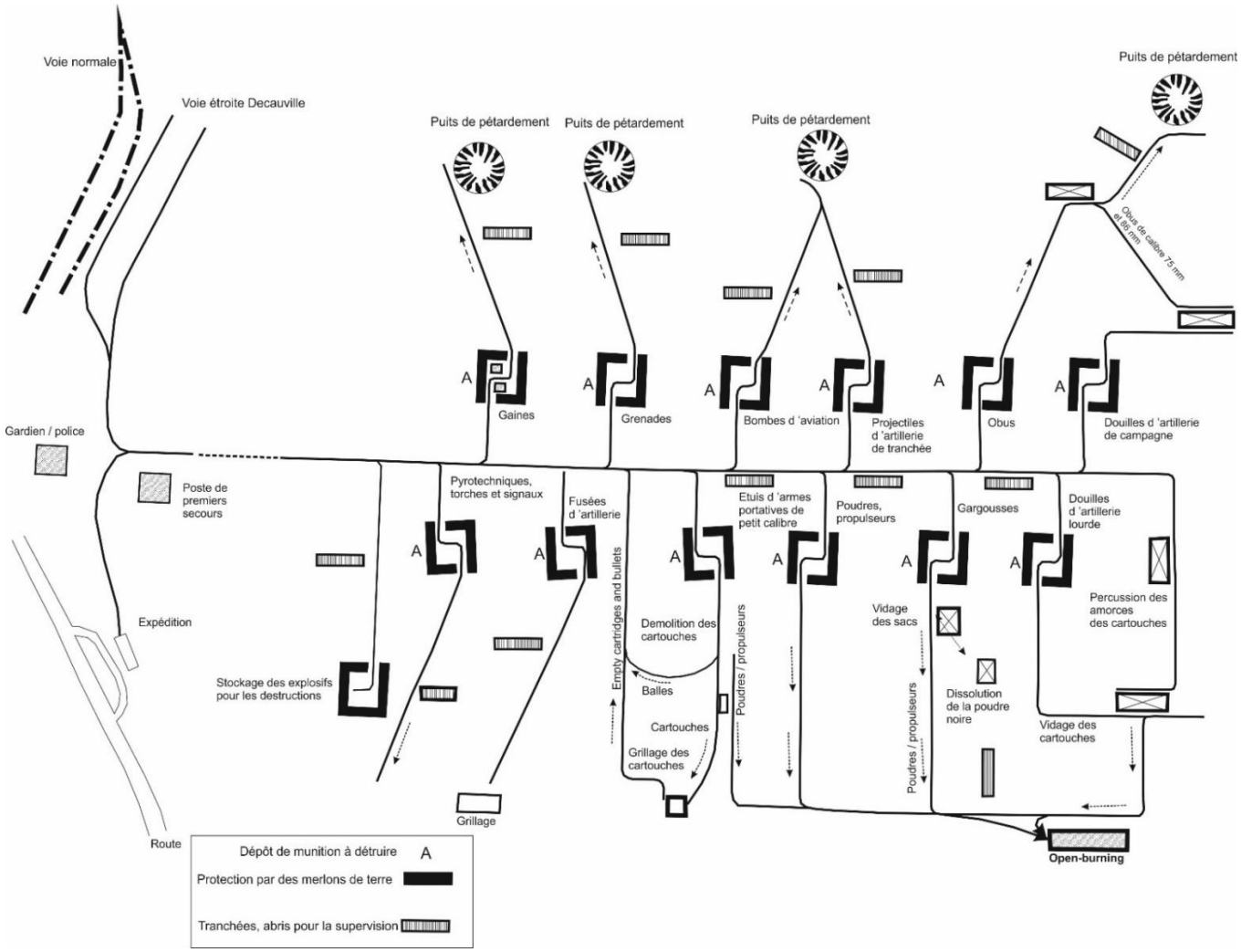


Figure 240 : Organisation d'un chantier de destruction de munitions dans l'Oise, dans l'entre-deux-guerres[1657].

[1657] Hubé, D. (2016). Redessiné d'après un plan conservé aux Archives Départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Artillerie. Instruction provisoire concernant le stockage, le triage et la destruction des munitions dans les régions frontières. Annexe 3. 7 juillet 1919.

4.3.3 Le retrait par dévissage des fusées et gaines d'éclatement : le désamorçage

La première étape du démontage des projectiles, et pas la moindre car la plus risquée, était la neutralisation des fonctions militaires des engins, par l'extraction du dispositif de mise à feu, à savoir, le détonateur formé par l'ensemble fusée / gaine d'éclatement. Cette opération délicate et dangereuse était réalisée dans des cellules (ou *boxes*) formées de merlons de terre (dénommées *cubic hall* au sein de F.N. Pickett & Fils, cf. Figure 243), de caisses de munitions lestées de sable, ou de traverses de chemin de fer érigées, permettant à l'opérateur d'être protégé en cas de détonation accidentelle. Les projectiles étaient maintenus par un étau. L'extrémité d'une longue clé, passant au travers de la paroi de la cellule, était fixée à la fusée, tandis qu'à l'autre extrémité, un volant ou un « T » (« *tourne-à-gauche* ») permettait à l'opérateur, en actionnant la clé, de dévisser la fusée. Pour certains obus de gros calibre, la fusée était située au culot qui était alors aussi dévissé (cf. Figure 244). Parfois encore, le dévissage était réalisé (pour les engins de petit calibre) par une simple clé actionnée avec l'aide d'un maillet.

A Hallschlag, les fusées-détonateurs étaient dévissées manuellement au moyen d'une clé, tandis que les projectiles étaient fermement maintenus entre les mâchoires d'un étau[1658].

Les opérations de dévissage des fusées prévues à l'ouverture de l'usine de désobusage Clere & Schwander de Muzeray (département de la Meuse) étaient décrites comme suit dans l'avis d'enquête publique pour le classement de l'usine *« les obus sont engagés dans un étau placé dans une fosse merlonnée destinée à empêcher la projection d'éclats lors d'explosions accidentelles ; une longue clé passant à travers d'un merlon en terre permet le dévissage en dehors de la présence de personnel, et ceci, pour tous les projectiles où le dévissage présente une possibilité d'explosion[1659] ».* Dans l'usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray, le dévissage d'obus chimiques était réalisé dans des *boxes* dont les murs étaient constitués par des traverses de chemin de fer, et le toit par des tôles cintrées (cf. Figure 242). Le retrait du couple gaine / fusée par dévissage ouvrait le réservoir rempli de toxiques de guerre formé par ces obus, et exposait les opérateurs aux risques d'intoxication. Afin de s'en prémunir, les opérateurs (au nombre de trois par *box*) étaient dotés de protections respiratoires (appareil » « Tissot ») et de tenues spéciales faites de cuir huilé (cf. Figure 251). Les gaines étaient retirées pour ensuite être brûlées ou réservées en attente d'un ennoyage ultérieur.

Il convient de noter que le retrait des fusées des munitions chimiques ex-allemandes s'avérait dangereux et nécessitait aussi de lourdes clés en « T » car les fusées dotant les engins à chargement liquide étaient solidarisées à l'ogive au corps de l'obus par un joint en ciment (oxy)magnésien (cf. Figure 241).

[1658] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*, *op. cit*. p.75.

[1659] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe). Etablissement d'une usine pour le Démontage d'Obus explosifs et toxiques à Muzeray. Enquête de Commodo et Incommodo. Signé : le Préfet de la Meuse. P. Emery. Bar-le-Duc, le 30 avril 1920.

Cette cimentation causa bien des soucis à certains industriels, comme l'association Marmier, Aigret et Sauron ayant à démolir des engins chimiques ex-allemands dans la 6e Région militaire au Camp de Chalons « *Elle [ndlr : l'usine à Ypérite] semble devoir donner de bons résultats. Toutefois son fonctionnement n'a pu être vérifié, la Société n'ayant pas encore trouvé de procédés industriels pour dévisser les fusées ou les gaines qui arment ces obus et qui sont fortement cimentées*[1660] »

Figure 241 : Obus chimiques allemands de 105 mm pour obusier léger de campagne montrant les anneaux blancs marquant les joints d'étanchéité en ciment magnésien, trahissant la présence d'un chargement chimique liquide[1661].

Enfin, une fois le couple fusée / gaine retiré, le chargement des projectiles devenait visible, ce qui offrait aux « démonteurs de munitions » l'opportunité d'une nouvelle inspection par observation pour orienter les projectiles vers les meilleures filières de déchargement (second tri). L'œil des ogives était ensuite obturé par des bouchons en bois ou par des bouchons vissés de protection dotés d'une poignée (maillon) pour le transport.

[1660] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 1644. Le Général Bunoust, Commandant l'Artillerie du VIe Corps d'Armée et de la 6e Région à Monsieur le Sous-Secrétaire d'Etat de la Liquidation des Stocks, Section Artillerie. Chalons-sur-Marne, le 14 octobre 1921.

[1661] Collection particulière, Bélot, H. Communication personnelle.

Figure 242 : Mise en scène d'une opération de désamorçage d'obus chimiques de gros calibre. Les obus sont immobilisés dans des étaux au centre de « cellules de dévissage » constituées de traverses de chemin de fer et de tôles cintrées. Une longue clé terminée à l'extérieur par un « T » est fixée sur la fusée. La fusée est désolidarisée du projectile par dévissage au moyen de la clé mue par deux manœuvres. Ces derniers portent des vêtements en cuir huilé et des appareils de protection respiratoire Tissot. Les obus désamorcés sont stockés debout sur la droite. Au premier plan, un tas de fusées. A l'arrière-plan, les cheminées des fours de brûlage des toxiques de guerre liquides sont visibles. Usine Clere & Schwander de Rampont, à Muzeray, département de la Meuse[1662]. Collection particulière, E. Hanotin.

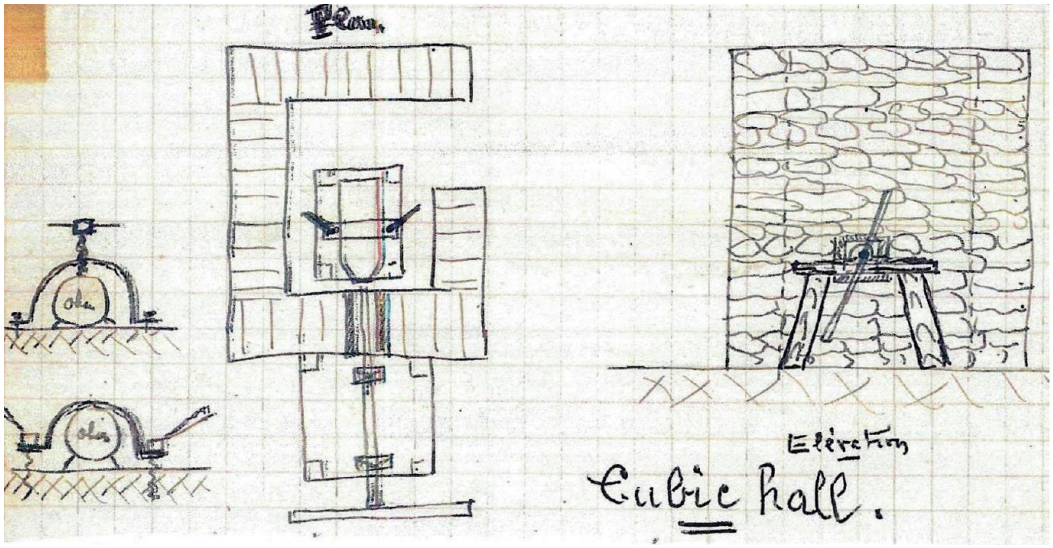


Figure 243 : Cellule merlonnée de désamorçage (« cubic hall »)[1663]. Usine F.N. Pickett & Fils D-Factory de Dannes Camier (département du Pas-de Calais). Dessin d'Etienne Lemaire.

[1662] Collection particulière Hanotin, E. Communication personnelle. Non daté.

[1663] Lemattre, M. (2018), d'après le récit d'Etienne Lemaire dactylographié en 1984. « *Le camp Pickett – Dannes (Pas-de-Calais) » Mémoire d'Opale n°10* -2018.

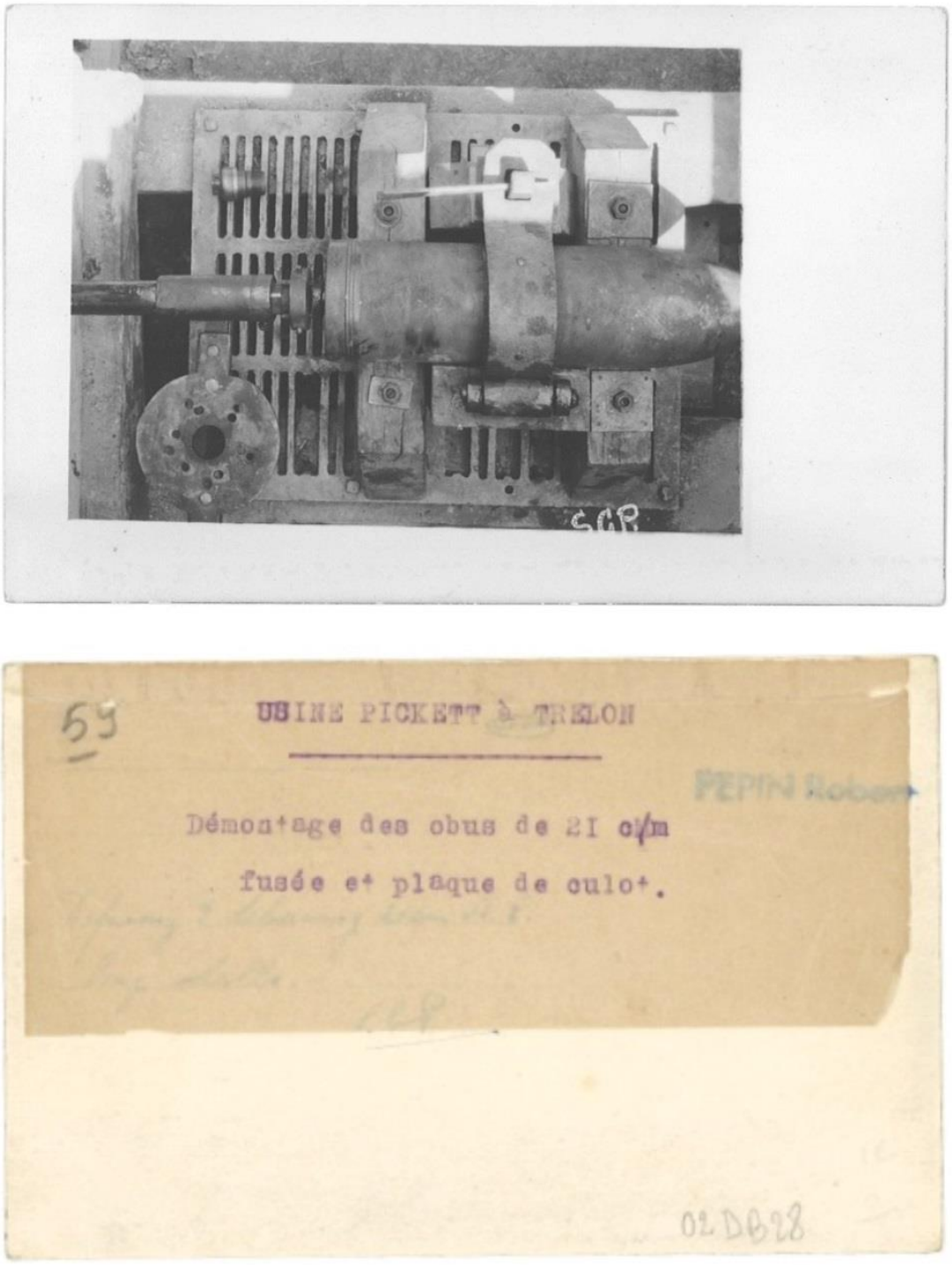


Figure 244 : Vue recto verso. Désamorçage par dévissage de la fusée de culot d'un obus chimique de 210 mm[1664], très possiblement à chargement liquide (vue la grille et le réservoir sous l'étau). Usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils de Trélon, département du Nord. Non daté.

[1664] Il s'agit du plus gros calibre pour les obus chimiques. Collection particulière. Communication personnelle.

4.3.4 Neutralisation des fusées d'artillerie

Généralités

Les fusées étaient soit brûlées à l'air libre (*Open Burning*) dans des tranchées de brûlage (dont les spécifications sont décrites dans les cahiers des charges de désobusage[1665]), soit grillées (*Rosting*) dans des fours spéciaux, dotés ou non d'un système de récupération du mercure (issu de la décomposition du fulminate de mercure des amorces) (cf. Figure 245).

A Hallschlag, les fusées étaient neutralisées dans un four souterrain dont la sole et le toit étaient constitués d'alignements de rails de chemin de fer[1666]. Le four était alimenté en fusées depuis la surface par une canalisation.

Dans l'usine F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers, les fusées en bon état étaient soigneusement démontées, les pièces métalliques triées. Les métaux ferreux étaient ensuite expédiés vers des aciéries en France (celles d'Outreau) et les non ferreux réexpédiés en Angleterre[1667]. Certains sites identifiés s'étaient spécialisés dans l'élimination de fusées, comme les sites Savot Frères & Cie et Meignie à la Chapelle-Saint-Ursin[1668], en 1929, à proximité de Bourges (département du Cher). Ces fusées[1669] étaient rachetées à l'Ecole Centrale de Pyrotechnie de Bourges (ECPB) pour les neutraliser (selon un cahier des charges produit par l'ECPB) et tirer profit du métal de récupération. Le premier atelier brûlait 500 fusées / jour d'un stock de 15 000, le second 13 500 unités / jour d'un stock de 90 000[1670]. Les fours étaient positionnés dans des fosses creusées dans le terrain et recouverts de tôles ondulées (pare-éclats). Les métaux issus du grillage (laiton, acier, etc.) furent ensuite revendus.

[1665] Chez F.N. Pickett & Fils à Dannes Camiers, les tranchées de brûlage de cinq mètres de longueur pour un mètre de largeur étaient bordées de part et d'autre d'empilements horizontaux d'obus de 150 mm déchargés. Une grille, reposant sur des rails, était disposée au-dessus du sol. Les fusées étaient placées en lits sur cette grille puis recouvertes de bois, aspergé de pétrole et de TNT. Le brûlage s'opérait de nuit.

[1666] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG, op. cit*, p.78.

[1667] Lemattre, M. (2018), d'après le récit d'Etienne Lemaire dactylographié en 1984, *op. cit.*

[1668] Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28 - 29. Gendarmerie nationale. Compagnie du Cher, arrondissement de Bourges. Procès-Verbal constatant renseignements faisant suite au P.V. n°420 des brigades de Bourges du 19 mai 1929 sur la destruction d'explosifs à la Chapelle-Saint-Ursin (Cher). 22 mai 1929.

[1669] De deux types, le premier renfermant 100 grammes de fulminate de mercure et 2 kg d'explosif pour 1 000 fusées et le second 5,2 kg de fulminate de mercure et 2,05 kg d'explosif pour 1 000 fusées. Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28 - 29. Service des Mines. Explosifs. Ateliers de destruction de fusées. Rapport. 20 juin 1929.

[1670] Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28 – 29. Service des Mines. Arrondissement Minéralogique de Clermont-Ferrand. Explosifs. Ateliers de destruction de fusées. Rapport. A Bourges, le 30 mai 1929.

Figure 245 : Fours de grillage de fusées d'artillerie dotés de cheminées d'évacuation et de dispersion des fumées (chargées en mercure). Au premier plan, un tas de fusées grillées. Usine Savot Frères & Cie d'Albert (département de la Somme), vers 1935[1671].

Design de tranchées de brûlage de fusées imposé par l'armée française

Un devis et un cahier des charges relatifs aux « *travaux de récupération des épaves métalliques provenant des opérations de guerre et se trouvant enfouies ou gisant sur le territoire du département de la Marne, le Camp de Tahure excepté* » daté du 20 septembre 1928, décrit un des dispositifs retenus par l'Armée française pour le grillage des fusées et des douilles de cartouches[1672].

Le brûlage s'effectuait dans des tranchées de 4 m de longueur, 1 m de largeur et 0,75 m de profondeur établies sur un terrain éloigné à minima de 150 m de tout lieu d'habitation, route, voies ferrées ou de navigation et/ou lignes électriques. À l'extrémité sous le vent, une ouverture en plan incliné était aménagée pour la mise à feu qui devait toujours s'effectuer contre le vent. Les parois des tranchées étaient étayées par des tôles et/ou des rails. Un lit de petit bois de 10 cm d'épaisseur était déposé au fond de la tranchée. Le bois et de vieux chiffons de nettoyage pouvaient être imbibés par du pétrole pour activer la combustion. Une couche constituée d'une épaisseur de fusée (sans gaine d'éclatement) était alors délicatement déposée sur le bois, en veillant à ne jamais superposer les engins. Ainsi, chaque opération de brûlage pouvait viser jusqu'à 5 000 fusées. Une fois le lit de fusées constitué, la tranchée était recouverte par des rails ou des poutrelles métalliques jointives pour éviter toutes projections. Cette couverture débordait volontairement de la tranchée afin d'obturer soigneusement la tranchée de brûlage.

La mise à feu s'effectuait au moyen d'un brandon embrasé, longue tige de fer munie d'un chiffon imprégné de pétrole.

[1671] National Archives, Washington D.C., number RG 306-NT, Box 367, *op. cit.*

[1672] Archives départementales de la Marne, site de Châlons-en-Champagne, cote 7 P 472-1.

Tous les ouvriers, à l'exception de celui en charge de la mise à feu, se devaient de quitter la zone de brûlage avant l'allumage. Lorsque toutes les dispositions furent prises, la mise à feu était effectuée et l'ouvrier en charge de ce travail quittait alors immédiatement le terrain ; seuls les gardes isolés dans une guérite en bois de 10 cm d'épaisseur (formée de traverses de chemin de fer) restèrent à proximité des tranchées pour veiller aux projections qui pourraient provoquer des incendies.

Les fusées n'étaient sorties des tranchées que 12 heures après la mise à feu, après quoi, elles étaient examinées par un artificier expérimenté qui s'assurait que tout l'explosif avait bien été détruit.

Design de tranchées de brûlage de fusées en vigueur chez F.N. Pickett & Fils

Kostevitch décrit son procédé qu'il vouait aux fusées ex-allemandes et britanniques. Les tranchées de brûlage ouvertes par F.N. Pickett & Fils faisaient quelque 10 pieds (3,3 mètres). Au fond, on plaçait aussi des rails, entre lesquels des tiges de caisse d'obus de 18 *pounders* (livres), séparées de 2,5 cm, étaient posées. Ce couloir situé à la base de la tranchée créait un drain qui offrait au feu un moyen de propagation très efficace. Un cordon de sécurité Bickford ou une traînée de poudre *Cordite* étaient aussi disposés au fond de la tranchée pour assurer son allumage. L'ensemble était aspergé de poudre NCT jusqu'à ce qu'une couche d'environ 1,5 centimètre se soit formée. Les tranchées ou rangées de brûlage identifiées sur photographies aériennes anciennes en Meuse, à Muzeray (usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont), à Vaudoncourt (usine Clere & Schwander de Noire Fontaine) comme à Autrecourt-sur-Aire (exploitant inconnu) correspondent vraisemblablement à ce type d'agencement et de procédé.

Les fusées chargées d'explosifs détonaient au grillage alors que les archives relatent le « crépitement » du grillage des fusées dans les fours au moment de la décomposition des amorces au fulminate de mercure. Les photographies de fours en fonctionnement, prises par un journaliste du vers 1935 dans le chantier Savot de Coucy-le-Château-Auffrique, montrent notamment la fumée qui s'échappe. Ces fours n'étaient vraisemblablement pas dotés à cette époque de filtres retenant le mercure issu de la décomposition thermique du fulminate de mercure. Les sols de surface sont possiblement marqués par le mercure à proximité de ces installations dans la direction des vents dominants. Le journaliste du *New York Times* qui visita les chantiers Savot Frères & Cie de Coucy-le-Château et Albert annota son reportage photo par « *la destruction des amorces qui crépitent en explosant*[1673] ».

4.3.5 Déceinturage *(debanding)* des projectiles

Le projectile désamorcé était maintenu par un étau (étape du « déceinturage **»**). Il apparaît au regard des archives consultées que le déceinturage ait été opéré sur des engins en attente de déchargement à l'eau chaude, à savoir des projectiles dont le chargement était « sûr » et suffisamment pur pour être fondu à l'eau en toute sécurité. Le déceinturage aurait par contre été effectué après brûlage des engins pour lesquels le chargement aurait été jugés impropre au déchargement à l'eau chaude « *[…] those which are completely emptied being sent back to the factory for debanding*[1674] ». Il s'agit en particulier des engins explosifs ex-allemands de la fin de la guerre chargés d'explosifs de piètre qualité (cf. Section 1h du présent manuscrit).

[1673] The National Archives, Washington DC, number RG 306-NT, Box 375, *op. cit*.

[1674] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives* », op. cit. p.67. Au sujet des opérations de déchargement d'obus explosifs ex-allemands à l'usine *B-Factory* à Westroozebeke.

La découverte sur le site de l'usine Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt d'un obus allemand de 77 mm court calciné mais possédant encore sa ceinture lisse en cuivre semble corroborer cette hypothèse.

Figure 246 : Opérations de déceinturage au marteau et burin (premier plan) et vidage à l'eau chaude (à l'arrière-plan). Usine F.N. Pickett & Fils E-Factory d'Audruicq (département du Pas-de-Calais)[1675].

Le déceinturage s'effectuait manuellement au moyen de burin et de maillets (cf. Figure 246 ci-dessus). Une fois les projectiles ouverts, il pouvait être procédé au vidage du contenu (encore appelé étape du « déchargement **»**). Plusieurs solutions étaient alors envisageables, selon la nature du chargement et son potentiel de valorisation.

4.3.6 Sciage et tronçonnage des bombes de tranchée

Un autre procédé de vidage et de neutralisation fut appliqué aux bombes et projectiles de tranchées par l'industriel alsacien Bouxin dans ces chantiers de Pénol (camp des Burettes, Terres Froides, département de l'Isère) (cf. Section 10h du présent manuscrit). Il consistait à extraire l'explosif des *casings* après les avoir ouverts par tronçonnage. Le 6 février 1921, l'autorité militaire fit cesser le pétardement de bombes de tranchées françaises de gros calibre et autorisa l'entreprise Bouxin à scier (tronçonnage) les munitions pour récupérer l'acier. La poudre de *Cheddite*[1676] fut brûlée sur place. Pour éviter toute étincelle, le sciage s'effectua sous l'eau[1677], et malgré ces précautions, un premier accident se produisit. Comme explicité à la Section 10h, toutes les conditions étaient réunies pour que l'explosif chloraté, même noyé sous l'eau, initie une détonation sous l'action des frictions et échauffements provoqués par la lame de la scie. Les accidents dramatiques que connut Bouxin sur son chantier isérois étaient inévitables.

[1675] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives », op. cit*, p. 79.

[1676] Terme générique utilisé par les Poudres & Explosifs désignant des explosifs brisants à base de chlorates ou perchlorates

[1677] L'absence d'oxygène ne garantit pas l'absence de risques d'explosion car ces explosifs renferment à la fois le comburant et le carburant énergétique. L'explosion peut être initiée sous l'eau sous l'effet de chocs ou de frictions.

Bouxin mit en pratique à Illkirch, dans son chantier de l'ancien dépôt de munitions ex-allemandes du MA3 (*Munitionsanstallt 3*), au sud de Strasbourg dès juin 1921, le procédé de tronçonnage (vraisemblablement sous l'eau) des bombes de tranchées[1678]. Les chantiers de l'entreprise Bouxin furent, au regard des archives consultées, les seuls à avoir appliqué ce procédé pour rebuter les munitions anciennes.

4.3.7 Déchargement des projectiles explosifs par fusion à l'eau chaude (*Wash-out*)

Pour les obus explosifs chargés d'*Amatol* (mélange à proportions variables de TNT avec du nitrate d'ammonium NH_4NO_3), le chargement était fondu au moyen d'un jet d'eau très chaude (90 - 100°C), un procédé connu sous le nom de *« wash-out »* (cf. Figure 247). Les obus, débarrassés de leur fusée et de leur ceinture, étaient placés, culot vers le haut, sur une rampe munie d'ajutages (dispositif permettant de produire un jet liquide à débit régulier) verticaux au-dessus d'une auge grillagée. Une puissante pompe envoyait un jet d'eau chaude à l'intérieur de l'obus. La pompe alimentait un circuit fermé pendant un temps donné jusqu'à atteinte d'une certaine densité du liquide.

Le chargement pouvait aussi être fondu dans des bains d'eau chaude comme pratiqué à Hallschalg sur des munitions non allemandes. Sur ce site, les munitions explosives allemandes furent déchargées par des jets d'eau chaude, après que les *casings* des engins aient été percés au moyen de foret en bronze[1679].

TNT et nitrate d'ammonium entraient alors en solution. F.N. Pickett & Fils avait installé sa plus grosse unité de vidage par fusion dans sa *E-Factory* à Audruicq dans le Pas-de-Calais. D'autres unités de vidage à l'eau avaient aussi été installées à Moliens-Abancourt (*F-Factory*), à Trélon Liessies (C-Factory) dans le département de l'Oise et à Dannes Camiers (*D-Factory*) (cf. Figure 247 ci-dessous). Cette technique fut également utilisée à Hallschag (Allemagne) et dans l'usine Clere & Schwander du canton de Spincourt.

[1678] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408.
[1679] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*, *op. cit*. p.82.

Figure 247 : Rampe de vidage d'obus explosifs de gros calibre. Les obus ouverts à l'œil sont placés ogive vers le bas, face à des buses d'où sortent des jets d'eau chaude sous pression. L'eau dissous progressivement l'explosif et les obus se vident. Usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils de Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais)[1680].

[1680] Imperial War Museum, collection John Savage (1920–1922), number Q113252.

4.3.8 Déchargement par brûlage à l'air libre (*Open Burning*) et terrains de brûlage (*Burning Grounds*)

Objectifs et principe

Le brûlage de projectiles à l'air libre (*Open Burning*, OB) sur des aires dédiées (*Burning Grounds*). dans des puits ou des tranchées de brûlage, était une solution de déchargement de projectiles explosifs ou chimiques appliquées lorsque les techniques « douces » par vidage / vidange (pour les engins chimiques à chargement liquide ou plus rarement gazeux) ou par fusion à l'eau chaude (pour les engins explosifs) étaient inadaptées au type de projectiles (comme pour les obus allemands à *Croix bleue* chargés d'explosifs et de fioles d'arsines solides) ou à leur état de conservation (obus à *Ypérite* figée, obus allemands à explosifs complexes difficiles à fondre, etc.). A noter qu'il n'est fait aucune mention dans les archives consultées de déchargement par brûlage de projectiles chlorates ou perchlorates.

Le principe du déchargement par OB est simple. Il se base sur le différentiel du comportement au feu entre les *casings* (en acier à récupérer, incombustibles) et le chargement organique (indésirable, à neutraliser et combustible).

Les poudres propulsives à base de nitrocellulose, se déstabilisant avec le temps (exsudation de nitroglycérine) pour les ergols doubles bases, devaient être éliminées par brûlage. La poudre noire (issue de certains obus explosifs ou des charges d'expulsion des obus à balles), était soit noyée (qui neutralisait la fraction saline KNO_3) soit brûlée.

Brûlage de poudres et propulseurs

Les poudres (en gargousses, en plaquettes ou en fagots) étaient détruites par brûlage à l'air libre. Pour cela des tranchées d'environ 5 m de longueur et 70 cm de largeur, pour une quarantaine de centimètres de profondeur, étaient ouvertes à même le sol. Les poudres étaient ensuite disposées dans la tranchée et allumées de sorte que le flamme (énergique) se propage d'un bout à l'autre de la tranchée selon la direction du vent. Parfois, lorsque les opérations de brûlage étaient répétées (comme c'est le cas dans les grands dépôts de munitions), les tranchées de brûlage étaient bordées de merlons en terre pour réduire les risques de projection de matériaux enflammés et « casser » le souffle d'éventuelles déflagrations.

La photographie de la Figure 226 (cf. Section 10h du présent manuscrit) montre le brûlage à l'air libre de fagots de nitrocellulose par des soldats britanniques à proximité de Cologne lors de l'occupation de la Rhénanie et dans le cadre de la démilitarisation de l'Allemagne (à noter la combustion très énergique et l'aire merlonnée au sein de laquelle le brûlage fut pratiqué).

La Figure 248 montre a) une longue tranchée de brûlage desservie par une voie étroite, non creusée dans le sol mais bordée par deux hauts merlons et b) une opération de brûlage de poudres propulsives à l'ERGMu de Mézidon-Canon au sud de Caen (département du Calvados) où étaient entreposés des projectiles de marine de gros calibre.

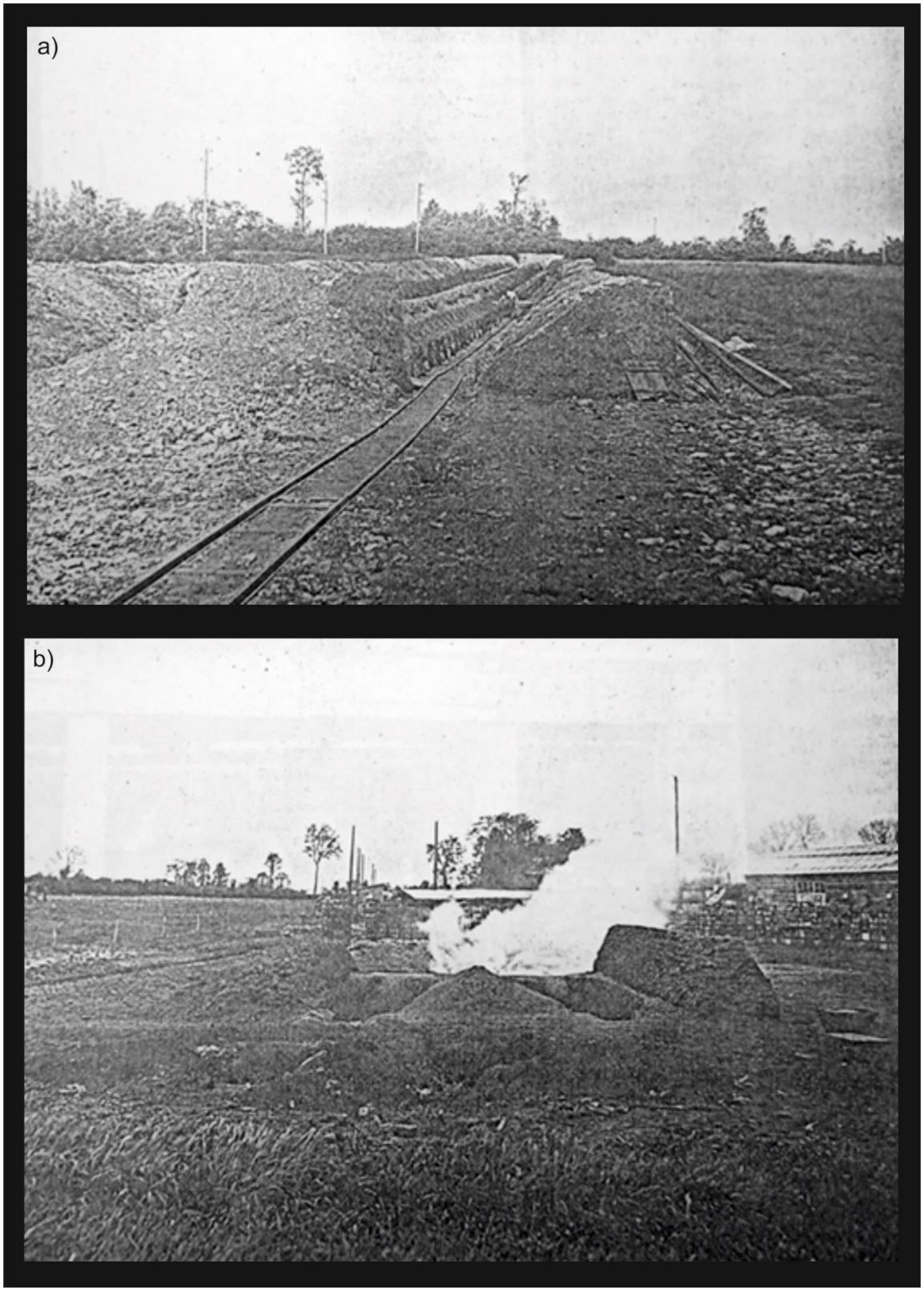


Figure 248 : Tranchée (a) et opération de brûlage (b) de poudres propulsives à l'ERGMu de Mézidon - Canon (département du Calvados). Probablement vers 1920, non date[1681].

[1681] https://forum.pages1914-1918.com/viewtopic.php?t=9980

Brûlage des explosifs

Les explosifs issus du traitement des effluents des unités de déchargement par *wash-out* jugés impurs (boues) et impropres à un recyclage (commercialisation) étaient brûlés sur les *Burning Ground* lors de séquences spécialement dédiées ou à la faveur de brûlage en tranchée d'autres projectiles chargés afin de booster la combustion. Il est par exemple fait mention d'un terrain de brûlage pour les explosifs issus de bombes d'aviation dans la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Trélon, de brûlage de *Cheddite* des bombes de tranchées françaises démolies sur le chantier Bouxin des Burettes ou encore de brûlage d'explosifs extraits de bombes de tranchées tronçonnées ex-allemandes dans le chantier du MA3 de Bouxin à Illkirch.

Figure 249 : Brûlage d'explosif ou de boues issues du vidage des obus explosifs sur la plage (vraisemblablement l'estran) à Dannes Camiers. Usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils. 1920-1922[1682].

Brûlage des projectiles à chargement explosif

Des obus explosifs furent aussi brûlés selon des méthodes et procédures dépendantes du type d'explosif chargeant les projectiles et leur calibre. L'organisation des aires de brûlage des obus explosifs était proche de celle retenue pour les engins chimiques. Les obus ouverts à l'œil ou au culot, selon les calibres, après le retrait des fusées et gaines, étaient disposés en deux rangées se faisant face, de part et d'autre d'une tranchée d'environ 75 cm de profondeur, sur quatre à cinq mètres de long (cf. Figure 251). Les ouvertures des obus étaient tournées vers le fond de la tranchée. Les obus de petit calibre étaient généralement jointifs alors que ceux de gros calibre étaient espacés d'une distance équivalente à au moins une fois le calibre pour se prémunir des risques d'explosion généralisée de la tranchée de brûlage par « sympathie ». Les obus étaient superposés en deux ou trois rangées, ou parfois placés à la verticale dans des puits de brûlage (cf. Figure 251)[1683].

[1682] Imperial War Museum, Collection John Savage, number Q113251.

[1683]National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*, p 65. Au sujet des opérations de brûlage de l'usine F.N. Pickett & Fils *B-Factory* de Westroozebeke.

L'ensemble était maintenu par des rails de chemin de fer. Une trainée d'explosifs ou de boues issues des ateliers de déchargement par *wash-out* était placée au fond de la tranchée, le tout recouvert de bois ou de *Cordite* (lorsqu'elle était disponible, chez F.N. Pickett & Fils) pour allumer le foyer. Une fois le foyer allumé, la montée en température provoquait la fusion de l'explosif qui s'écoulait par gravité, depuis l'ouverture de l'ogive ou du culot, dans la tranchée où, déconfiné, il se consumait à même le sol, sans exploser. Ces tranchées de brûlage étaient compartimentées par des merlons en terre pour des raisons de sécurité (limiter les risques de propagation d'une éventuelle détonation). La mise à feu du dispositif était réalisée la nuit, lorsque les chantiers de désobusage étaient exempts de personnel.

La combustion de l'aire de brûlage et de ses obus était décrite comme suit à l'usine F.N. Pickett & Fils de Westroozebeke « *As soon as the lighting takes place dense columns of black smoke begin rise, and these later give way to flames which, burning through the night, make a weird and impressive scene*[1684] ». La Figure 250 montre un panache de fumée s'élevant d'un brûlage de 100 tonnes de munitions sur l'aire de brûlage de la *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke. Cette photographie fut prise 30 minutes après allumage du foyer.

Figure 250 : Panache de fumée issu d'un foyer de brûlage à l'usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke (Belgique). Non daté. Noter au premier plan les chandelles d'arbres décapités par les bombardements durant la guerre [1685]

Le journaliste Pierre Soulaine qui enquêta sur le « *Désarmement du sol* » en France fit le récit d'une opération de brûlage de nuit à l'usine F.N. Pickett & Fils de Dannes Camier dans le numéro du *Figaro* du 28 mai 1921. Il s'exprima en ces termes, sur un ton à la fois exalté et teinté d'un léger romantisme « *Quand les jours étaient plus courts, les passagers des steamers qui traversaient le Pas-de-Calais eurent souvent le soir un spectacle extraordinaire. Une lueur immense déchirant la nuit, incendiait la côte française d'une lumière aussi éclatante que celle du jour. Cette lumière vue de la côte anglaise paraissait une aurore. […] Il [ndlr : le phénomène] provenait plutôt du plus grand feu de joie qu'un peuple ait jamais allumé sur la grève puisqu'il témoignait qu'une des usines de la firme Pickett brûlait les résidus d'explosifs contenus dans les engins de mort accumulés en France pour la guerre*[1686] *».* Il n'est pas précisé ici s'il s'agit d'une brûlage d'explosif sur le bord de mer (cf. Figure 249) ou d'un brûlage de munitions en puits ou tranchées.

[1684] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives* », *op. cit*, p 67. Au sujet de Westroozebeke.

[1685] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair. « F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*, p 65.

[1686] Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Figaro* du 28 mai 1921, *op. cit*.

Au matin, l'aire de brûlage était inspectée par le *Danger Buildings Officer* pour s'assurer que le foyer était éteint et que les explosifs des engins s'étaient bien consumés. Si des traces d'explosifs subsistaient, les résidus étaient réservés pour intégrer l'opération de brûlage suivante.

Des designs de puits de brûlage spécifique aux engins chargés de *Lyddite* (*Mélinite*) avaient aussi été imaginés.

Rares sont les photographies montrant les opérations de brûlage en tranchée. En ce sens les documents photographiques issus d'une collection privée concernant les opérations de brûlage à l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray sont exceptionnels. Une mission aérienne datant de 1922 a par ailleurs permis de photographier depuis le ciel ce qui est figuré depuis le sol, montrant les tranchées de brûlage parallèle desservies par des voies étroites convergent vers un atelier dont la fonction reste à ce jour indéfinie (cf. Figure 252 et Figure 253).

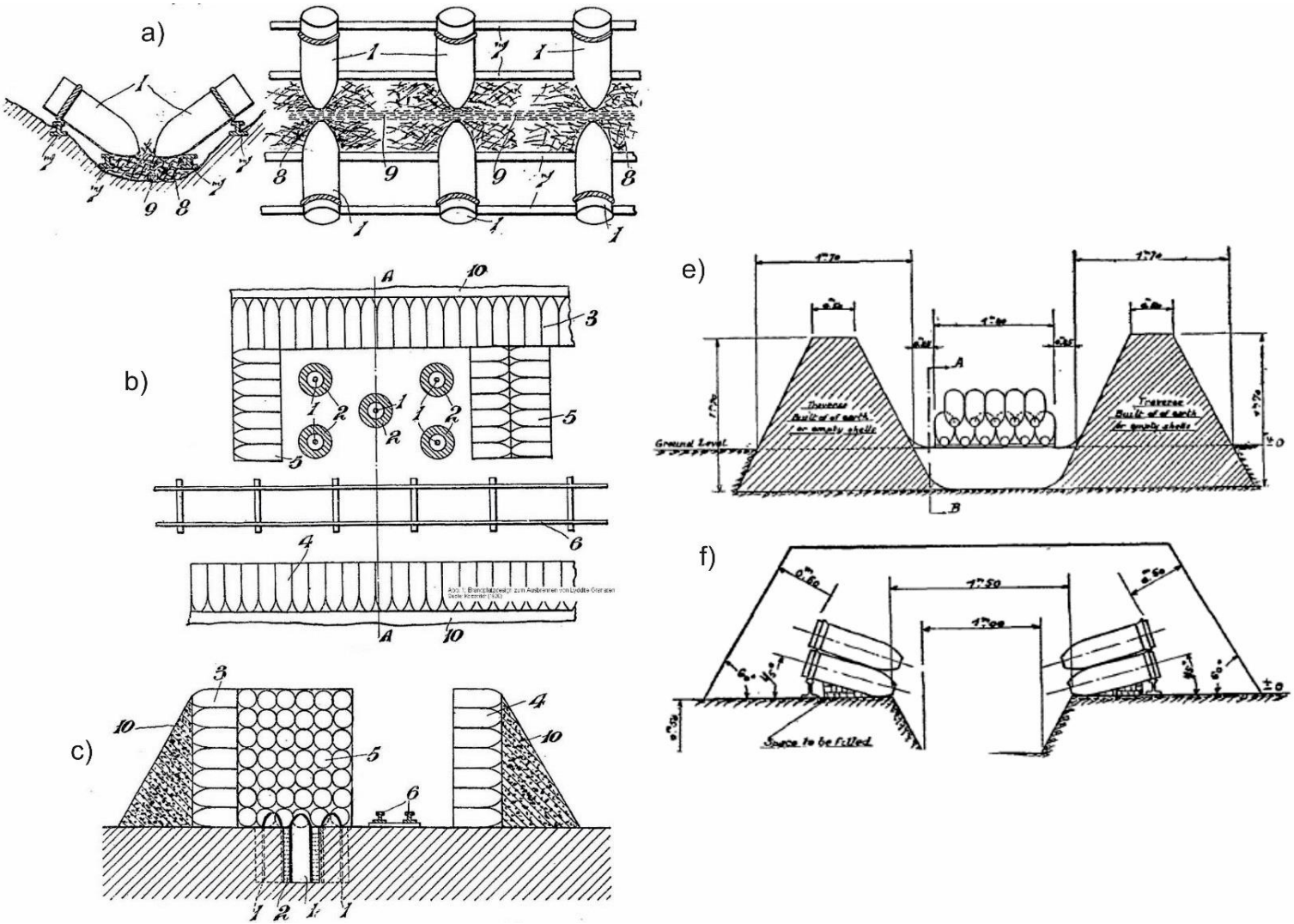


Figure 251 : Opération de brûlage de F.N. Pickett & Fils. Disposition de tranchées de brûlage[1687].

[1687] Tiré de *"Anonymus: Man who cleaned-up France: how shells and poison gas were rendered harmless" The Daily Graphic* du 26/07/1923.

Figure 252 : Tranchées de brûlage de l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). 1922. A noter les personnels au second plan doté d'appareils de protection respiratoires « Tissot » et de tenues spéciales faites de cuir huilé. Non daté[1688].

Figure 253 : Tranchées de brûlage de l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). 1922[1689].

[1688] Collection particulière E. Hanotin. Communication personnelle. Non daté.

[1689] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001.

Brûlage de munitions à chargements chimiques

- **Munitions allemandes à *Croix bleue***

Les obus à *Croix bleue* étaient les seuls engins chimiques de la Première Guerre mondiale à chargement solide. Ces projectiles ne pouvaient de toute évidence pas être vidés par vidage comme pour les munitions à chargement liquide ou gazeux, la fiole en verre renfermant les arsines solides (pour les calibres 77, 105 et 155 mm) étant noyée dans l'explosif solide (TNT et/ou dinitrobenzène (DNB) notamment). Michael Kostevitch imagina alors des séquences de brûlage en tranchée pour détruire ces obus. Kostevitch décrivit les méthodes de démolition par brûlage, comme celle pratiquées sur quelques 200 000 obus à *Croix bleue* dans ce lieu pollué qui portera cents ans plus tard le nom de « Place à gaz », comme suit.

> *« Le terrain de brûlage doit être préparé comme suit: des tranchées, profondes de 30 cm, large de 60 cm à leur base et de 90 cm en surface, de 14 mètres de long, doivent être creusées et une couche de calcaire de 4 cm d'épaisseur doit être placée à leur base avant chaque opération de brûlage. Les obus de 77 mm (après dévissage de la fusée et l'obturation de l'œil par un bouchon conique en bois) après leur arrivée sur l'aire de brûlage sont placés côte-à-côte, pointant l'ogive vers le bas selon un angle de 10° en quatre rangées superposées. Les ouvertures des obus doivent être alignés. Les projectiles de 105 et 150 mm doivent être disposés de la même manière mais séparés les uns des autres par une distance équivalente à deux fois le calibre afin d'éviter les détonations par sympathie[1690]. Une seule rangée d'obus doit être envisagée dans ce cas. La tranchée est comblée, après coup, de bois formant un massif qui déborde d'au moins un mètre de l'extrémité de la tranchée, pour une hauteur double à celle des rangées d'obus.*
>
> *Le bois est aspergé par les résidus issus du vidage d'obus explosifs par l'eau chaude, tout comme par les poudres d'acide picrique en quantité suffisante pour attiser le brasier. Immédiatement avant que le bois est placé dans la tranchée, les bouchons sont retirés et placés dans des caisses spéciales à l'écart de la tranchée. Le feu doit être allumé au moyen d'une perche à au moins cinq mètre. Le contremaître et ses assistants, avant d'avoir allumé le cordon Bickford, doit être certain que tout le monde à quitter l'aire de brûlage. Le feu doit être mis en sorte que le feu se propage contre le vent.*
>
> *Le contremaître se retire alors. La réalisation de ces brûlages d'obus en dehors des heures d'activité dans l'usine est une règle. Le brûlage n'excède pas deux heures, mais personne ne devait approcher l'aire de brûlage avant la reprise du travail le lendemain. Le lendemain matin, les représentant du « "Empty Shells Inspection Department" doivent, après s'être équipe de gants spéciaux, masques, etc. être certains que le contenu de chaque obus a été détruit par le feu et que l'obus est vide. Dans le cas contraire, ou qu'une fiole n'ait pas été brisée, ces derniers serait à reboucher et réservés pour la prochaine opération de brûlage pour le jour suivant.*
>
> *Après que tous les obus vides ont été retirés, les tranchées doivent être méticuleusement nettoyées, et les explosifs non brûlés, s'il y en a (ce qui est extrêmement rare), collectés et placés dans des caisses en bois détruites le lendemain matin sur une aire de brûlage.*

[1690] Terme utilisé pour désigner une détonation induite par l'onde de choc d'une détonation proche voisine.

Le gaz contenu dans les obus à Croix bleue de 210 mm est contenu dans un réservoir en tôle cannelée. En conséquence du gaz peut subsister après le premier brûlage. Pour être certain de sa complète dissipation, l'obus à gaz en question doit être soumis à un processus spécial de brûlage qui doit être répété huit fois.

Le procédé consiste, après la première combustion, à boucher de façon lâche les obus dans la tranchée. Pour ces aires de brûlage spéciales, les obus à Croix bleue de 210 mm doivent être placés de part et d'autre de bombes allemandes de 250 mm de sorte que la chaleur dégagée par le feu et les mines chauffe le contenu des obus chimiques[1691]».

Ces extraits de documents d'archive montrent clairement que la combustion des foyers de brûlage était incomplète car laissée libre et sans surveillance (sans être éventuellement entretenue) durant la nuit. D'autres archives le laisse sous-entendre comme cet extrait, cocasse « *On s'est lancé un grand défi en brûlant et vidant les obus chimiques allemands, en particulier ceux contenant de l'arsenic. Le toxique allemand sternutatoire ne pouvait être éliminé que de cette sorte. Toutefois, la combustion n'était pas toujours complète. Un des tours favoris du contremaître du chantier de brûlage est de faire tomber l'intensité du feu, juste avant l'arrivée de visiteurs, afin qu'ils aient une petite expérience de ce à quoi ressemble l'"arsenic gas". Un des "gentlemen" qui a inspecté notre usine de Belgique, sur injonction de la Cour, dans l'intention d'un procès, s'est tellement approché des obus en combustion qu'il s'est mis à éternuer à un tel point que sa fausse dent a sauté de sa bouche dans le brasier et a lentement disparu*[1692] ». Au-delà de la défiance du personnel de chez Pickett de Westroozebeke à l'encontre des autorités en charge de l'inspection et du contrôle des chantiers de désobusage qui transparait clairement au travers de cet écrit, c'est bien le caractère incomplet de la combustion des obus à *Croix bleue*, connu des techniciens de l'entreprise, qui se confirme ici.

L'entreprise F.N. Pickett & Fils sut tirer profit de l'environnement dans sa plus grande usine, celle de Dannes Camiers (*D-Factory*). Le lavage journalier des sables de l'estran par les flots et les jusants des marées était idéal pour effacer les traces laissées par la destruction de munitions. Des méthodes singulières de destruction de munitions, poudres et explosifs y furent mises en œuvre. Des obus à *Croix bleue* chargés d'arsine étaient ainsi éventrés à marée basse par une charge explosive (pétardement de bas-ordre). Le reste était mis à bruler[1693]. Le brûlage des explosifs non recyclables – à détruire - provenant des installations de déchargement par vidage à l'eau chaude était aussi pratiqué sur l'estran à Dannes Camiers (cf. Figure 253).

- **Brûlage de munitions chimiques à chargement liquide**

Pour les engins chimiques jugés trop risqués à démonter, ou à déchager par vidage, le brûlage à l'air libre fut pratiqué. Des données archivistiques et des mesures effectuées sur des sols issus d'aires de brûlage d'obus à *Croix bleue* de la « Place à gaz » montrent que des obus à *Ypérite* y furent aussi brûlés (cf. Section 4e). Des obus chimiques à chargement liquide furent brûlés dans des tranchées de brûlage. Le corpus d'archive relatant ces pratiques sont rares et trop peu précises pour que les dispositifs de brûlage de ce type d'engins réellement opérés puissent être décrits

[1691] Kostevitch, M. (1926). « *Burning out filled projectiles ». The Coast Artillery Journal 65* : 463-473 / Kostevitch, M. (1927) : *H. E. & P. : Burning ground*. Paris. Patent GB212357.

[1692] Anonymous : *Man who cleaned-up France : how shells and poison gas were rendered harmless, op. cit.*

[1693] Michel Lemattre, *Le camp Pickett – Dannes (Pas-de-Calais*), *op. cit*.

La neutralisation par brûlage de munitions chimiques est relatée sur le chantier de désobusage Bouxin de l'ERGMu de la Ferté-Hauterive dans le département de l'Allier[1694] : 160 000 obus en acier de calibre 75 mm, 30 000 obus de 120 mm F.A., 11 000 obus de 145 mm F.A. et 142 000 projectiles de 155 mm F.A[1695] sans que soient réellement précisées les méthodes employées pour cela.

Selon le courrier du lieutenant Cornevaux chargé des Services de l'Artillerie et contrôleur militaire de Clere & Schwander à Monsieur le Général Commandant l'Artillerie du VIIe Corps d'Armée du 17 juin 1922, des opérations de brûlage d'obus à *Croix jaune*, chargés d'*Ypérite*, auraient été menées dans son chantier de la foret de la Hardt, et uniquement de nuit, lorsque le chantier était vide de personnel[1696]. Les brûlages étaient pratiqués de nuit au regard de ces archives et des témoignages relatés par la presse. Ces pratiques de brûlage furent aussi en vigueur au sein de la maison Pickett.

A noter que chez Clere & Schwander, en Meuse comme dans la forêt de la Hardt, des opérations de brûlage furent opérées sur des caffûts issus du vidage de munitions chimiques à chargement liquide dans le but de débarrasser ces vieilles ferrailles des égouttures avant leur expédition pour être refondues.

4.3.9 Déchargement des engins chimiques à chargement liquide par vidage

En ce qui concerne les projectiles chimiques, à chargements gazeux et liquides, des mesures de sécurité particulières furent inscrites dans les clauses des marchés de démolition de munitions, dérivées de celles appliquées dans les ateliers de chargement, compte tenu des risques élevés de brûlures et/ou d'intoxication au moment de la manipulation et du vidage de ce type de projectiles « *En principe, et surtout pour les obus à Vincennite, Collongite et Ypérite, il y aura lieu d'appliquer les mesures de sécurité prescrites dans les ateliers de chargement d'obus toxiques et reconnues utiles*[1697] ». Des équipements de protection individuels (EPI) furent aussi mis gratuitement à disposition par les donneurs d'ordre aux industriels titulaires des marchés de démolition pour ces opérations périlleuses : vêtements en toile huilée, appareils respiratoires Tissot, masques, etc. Chez F.N. Pickett & Fils, le personnel de la *B-Factory* affecté au four de neutralisation était doté de vêtement et de masques de protection, et celui, évoluant dans l'environnement de cette installation était sommé de garder un masque à gaz sur soi en permanence, prêt à l'usage, le risque d'engins fuyards (parmi les 30 à 40 projectiles à vider dans une passe par four) ne pouvant pas être écarté.

Pour les chargements à base d'*Ypérite* ou de *Chloropicrine* plusieurs solutions techniques furent retenues.

[1694] Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. La Ferté-Hauterive (Allier). Etablissement Bouxin.

[1695] Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. Ministère de la Guerre, Marché de gré à gré pour la démolition d'obus spéciaux stockés à l'Entrepôt de Réserve Générale de la Ferté-Hauterive. Passé en exécution du §5 de l'Article 18 du décret du 18 novembre 1882. Le présent marché a été approuvé par décision ministérielle n° 77950 – 2 / 3 du 24 octobre 1922. La Ferté-Hauterive, le 25 novembre 1922.

[1696] Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le lieutenant Cornevaux chargé des Services de l'Artillerie et contrôleur militaire de Clere & Schwander à Monsieur le Général commandant l'Artillerie du VIIe Corps d'Armée. 17 juin 1922

[1697] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 4317-1, B 30035. Règles techniques- Article 18 du contrat Aigret & Sauron pour la démolition des munitions entreprosées au Camp de Châlons 6e Région militaire du 30 octobre 1920.

F.N. Pickett fit breveter entre 1919 et 1921[1698] un dispositif de vidange des obus à chargement liquide, presqu'entièrement automatisé pour limiter au maximum les manutentions et donc les situations à risques pour les opérateurs (cf. Figure 254). Les obus étaient vidés par aspiration sous vide (au travers de l'orifice de remplissage) dans des chambres hermétiques, puis remplis d'un liquide de neutralisation (à base de lait de chaux), pour ensuite être brisés puis débarrassés des éventuelles égouttures résiduelles dans un four rotatif. Aucune indication dans les archives consultées dans le cadre de cette recherche n'a pu être identifiée pour déterminer si oui ou non ce dispositif avait été mis en œuvre de façon opérationnelle dans ses usines du nord de la France et de Belgique.

F.N. Pickett & Fils neutralisa aussi des toxiques de guerre dans des fours spécialement conçus à cet effet, permettant, par de légers ajustements techniques, de détruire une vaste gamme de produits agressifs. Ces fours étaient dotés de dispositifs de contre-lavage à l'eau. Le rapport de l'Institut d'Hygiène de Biologie et Chimie de l'Armée daté de mars 1922 décrit un tel four, observé dans l'usine *B-Factory* de Poelkapellen / Westroozebeke, comme suit : « *Essentiellement un four de matériaux réfractaires avec un plancher horizontal, le four se poursuivant par 1) une cheminée légèrement inclinée constituée de carneaux en grés dans lequel circule un flux d'eau continu 2) une cheminée horizontale faite de briques réfractaires d'une longueur de 5 à 6 m 3) et dans son prolongement une cheminée verticale d'une hauteur d'environ 10 mètres. Le flux d'eau qui circule au travers de la première entre dans le conduit par des ouvertures percées dans la partie la plus haute et la quitte par une ouverture localisée à l'extrémité la plus basse à proximité du point où la cheminée coudée et la cheminée horizontale se rejoignent* [1699]».

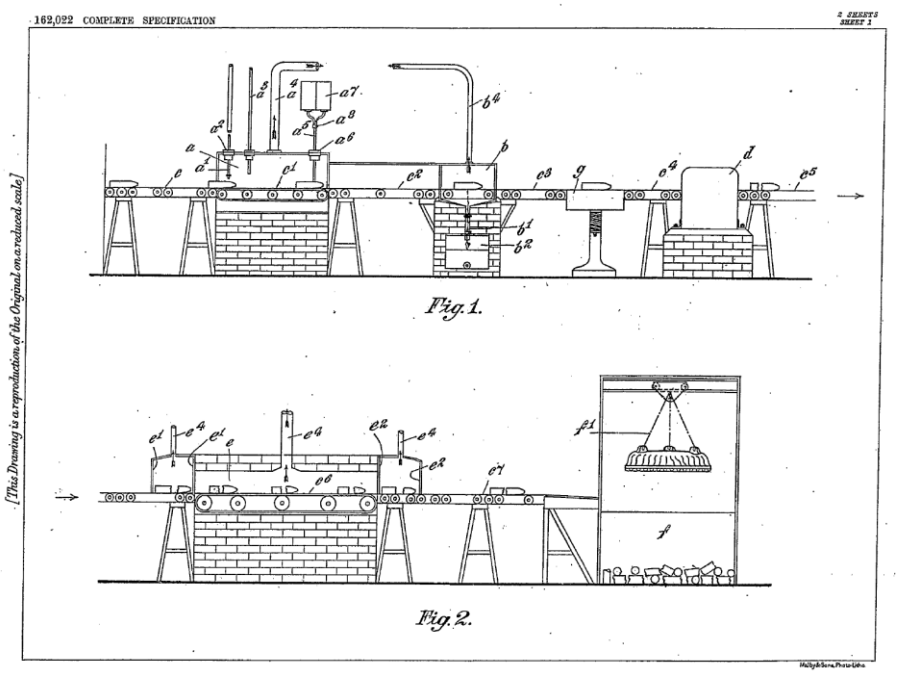


Figure 254 : Dispositif de vidage d'obus chimiques à chargement liquide par aspiration sous vide breveté par F.N. Pickett & Fils[1700].

[1698] Patent specification. 162 022. Application date : Dec. 11, 1919. N° 31,084 /19. Complete Left : Oct. 11, 1920. Complete Accepted : Apr. 11, 1921. *Means for Breaking Down Gas Shells*.

[1699] Centre de Documentation Historique, Evere. Institut d'Hygiène de Biologie et Chimie de l'Armée. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Rapport par Paul Erculisse, Pharmacien de 1er Classe, Chef du Laboratoire de Chimie Toxicologique, Dr Sillevants, Médecin de Régiment, Chef du Laboratoire de Physiologie Toxicologique et le Capitaine-Commandant Van den Berghe. Document no. C/28, Bruxelles, 3 mars 1922.

[1700] Patent specification. 162 022. Application date : Dec. 11, 1919. N° 31,084 /19, *op. cit.*

On retrouve dans le descriptif des opérations de vidage des engins chimiques prévues dans l'usine Clere & Schwander de la ferme de Rampont à Muzeray, des dispositifs et protocoles d'ouverture des projectiles se rapprochant de ceux brevetés par Pickett (avec ouverture dans des chambres sous aspiration et neutralisation des gaz » « *Les obus sont débouchés dans des chapelles assez résistantes pour résister aux projections accidentelles de produits. Ces chapelles sont reliées à un carneau d'aspiration de fort diamètre par où les gaz dégagés sont conduits, soit à des colonnes de neutralisation lorsqu'il n'y a rien d'utile à en retirer, soit dans des appareils de récupération lorsqu'il y a lieu d'en retirer les produits utilisables. Chaque chapelle est dans un atelier isolé des autres par une cloison. Les colonnes ou appareils sont toujours suivis d'un ventilateur puissant, de sorte qu'une fissure accidentelle se produisant en un point quelconque donnera lieu à une rentrée d'air et non à une sortie de gaz. Une cheminée de 10 à 12 m de hauteur évacuera l'air putréfié résiduel et les dernières traces de gaz pouvant y subsister, mais toujours à une teneur assez faible pour ne pas être dangereuse*[1701] ».

Les archives relatent les vidages de projectiles à chargement liquide selon des méthodes bien plus rudimentaires que le dispositif semi-automatisé breveté par F.N. Pickett. Après le perçage (« trépanation », vraisemblablement au moyen de forets en bronze) des engins (au niveau des orifices de remplissage scellés au plomb (cf. Figure 255 et Figure 257) ou l'ouverture des réservoirs (i) les toxiques était vidés par écoulement gravitaire dans des contenants pour être soit neutralisés (à la chaux pour l'*Ypérite,* ou par hydrolyse au contact de l'eau), soit infiltrés dans des puits perdus (de 2,5 m de profondeur « *dès lors qu'il n'y a pas de risques de contamination de puits et cours d'eau*[1702] ») ensuite remblayés (comme sur le site *Clere & Schwander* de la forêt de la Hardt à proximité de Mulhouse) (ii) les toxiques étaient aussi vidés et déversés dans des goulottes en béton pour être acheminés vers des brûleurs, comme sur le site Clere & Schwander en Meuse (cf. Figure 256). A noter que l'ouverture des réservoirs contenant les toxiques liquides était réalisé par le simple retrait de la gaine d'éclatement (renfermant 90 grammes de *Mélinite*) pour les obus à *Ypérite* français de 150 et 155 mm, le *casing* du projectile formant lui-même le réservoir. Ces engins ne nécessitaient aucun perçage préalablement à leur vidage.

[1701] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe). Etablissement d'une usine pour le Démontage d'Obus explosifs et toxiques à Muzeray. Enquête de Commodo et Incommodo. Signé : le Préfet de la Meuse. P. Emery. Bar-le-Duc, le 30 avril 1920.

[1702] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-aux-Temple, cote 43 25-1. Selon l'Article 11 du Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt entre le Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (Liquidation des Stocks) représenté par M. Paul Morel d'une part et MM. Clere & Schwander d'autre part. (En manuscrit, dans la marge, une date : 17 septembre 1919).

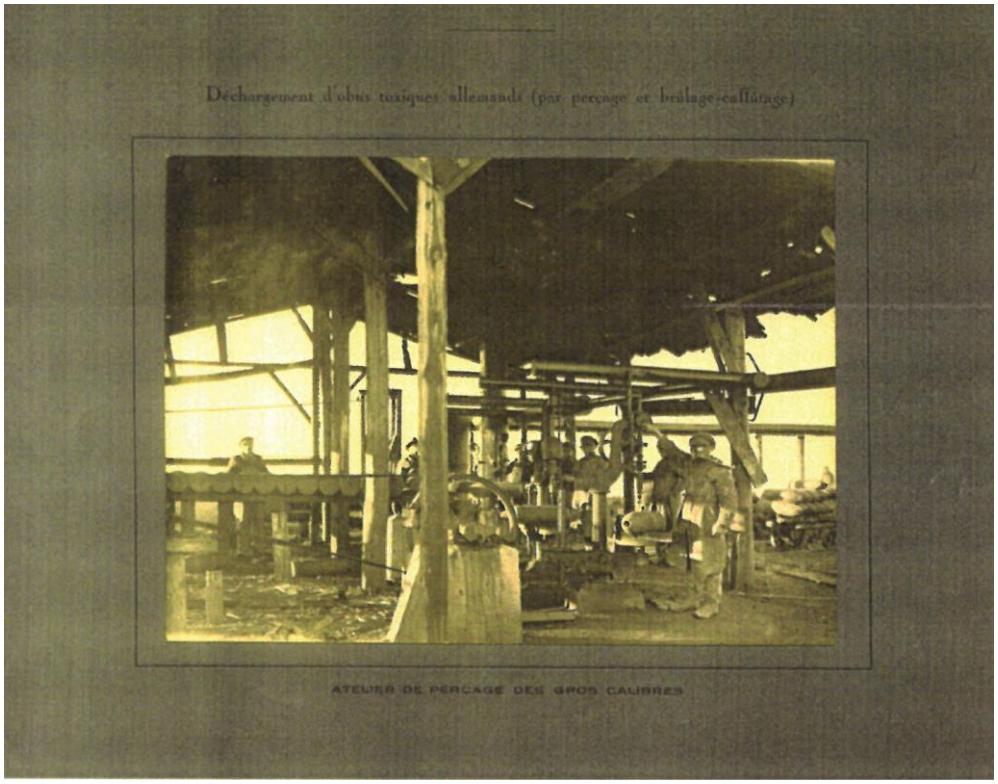


Figure 255 : Perçage d'obus chimiques de gros calibre par des personnels protégés. Ateliers de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt, canton de Spincourt, département de la Meuse[1703].

Figure 256 : Vidage d'obus chimiques à Ypérite. L'Ypérite est déversée dans la goulotte de collecte visible sur la droite. L'ypérite est destinée à être brulée. Un seau au centre du cliché contient de la chaux pour neutraliser les égouttures. Le personnel porte des vêtements en cuir huilé et des protections respiratoires. Usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray, département de la Meuse. A droite un personnage en costume sans protection. Il s'agit possiblement d'une mise en scène à des fins publicitaires[1704].

[1703] Collection particulière Marie-Odile François. Communication personnelle. Non daté.

[1704] Collection particulière E. Hanotin. Communication personnelle. Non daté.

Figure 257 : Obus chimique britannique de 115 mm à double diaphragme[1705]. L'obus calciné a été déceinturé et son orifice de remplissage percé. La presse locale relate un accident survenu avec ce type d'obus chargé de chloropicrine suite au brûlage. Ces obus étaient vidés par vidange après perçage de l'orifice de remplissage. Le brûlage était destiné à débarrasser l'acier des égouttures. Atelier de destruction Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt, département de la Meuse[1706].

4.3.10 Déchargement des munitions chimiques à chargement gazeux.

Les archives relatives aux opérations de désobusage industriel des entreprises F.N. Pickett & Fils et Clere & Schwander respectivement dans leurs usines de Dannes Camiers et Spincourt apportent de précieuses indications sur l'art et la manière de neutraliser les engins chimiques à chargement gazeux.

Les toxiques gazeux de l'artillerie chimique de la Grande Guerre étaient principalement le phosgène (suffocant de formule $COCl_2$) des obus à *Croix verte* (*D-Stoff*) allemands, de l'obus n°5 (*Collongite*) français, du cylindre WS (*White star*, un mélange de phosgène et de chlore) et du projectile de mortier *Stokes* CG, tous deux britanniques. Bien qu'étant à l'état gazeux à l'air libre, les obus à *Croix verte* étaient chargés avec du phosgène liquéfié après avoir été refroidi (le point d'ébullition de ce gaz se situant aux alentours de 8°C). L'acide cyanhydrique (*Forestite,* HCN) était un toxique cellulaire mortel qui entrait dans la composition de la *Vincennite* (50% en mélange avec les agents fumigène *Marsite* ($AsCl_3$) et *Opacite* ($SnCl_4$)) qui chargea des obus chimiques français n°4 de tous calibres à compter de juillet 1916, ainsi que l'obus britannique VN.

[1705] Il s'agit du seul obus de la Grande Guerre spécialement conçu pour la gare chimique, les autres projectiles étant des adaptations pour la guerre chimique d'engins à chargement explosifs.

[1706] Hubé, D. (2018).

A Dannes Camiers, chez Pickett, les obus de petit calibre et en mauvais état, furent brûlés après avoir été débarrassés de leurs fusées. Ils furent pour cela placés debout dans un four, l'ogive vers le haut. Puis les obus furent ouverts par une petite charge explosive qui détonait par la chaleur au début du brûlage. Les obus qui ne s'étaient pas ouverts au moment du premier brûlage étaient repris pour une seconde opération.

Pour les autres obus, français et britanniques, de gros calibre et en meilleur état, on substituait au bouchon en plomb (obstruant l'orifice de remplissage), un bouchon d'acier muni en son centre d'un trou conique bouché à la paraffine. A l'introduction dans le four, la paraffine s'échauffait et fondait, tandis que la pression interne de l'obus augmentait drastiquement, provoquant l'expulsion violente du phosgène au travers de l'orifice, entraînant avec lui l'agent fumigène ($AsCl_3$) avec lequel il était mélangé[1707]. De la vapeur d'eau était introduite en grande quantité dans le four, neutralisant le phosgène selon la réaction $COCl_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + 2HCl$. Les projectiles allemands étaient quant à eux directement envoyés tels quels dans le four. Le mélange $CO_2 + 2HCl$, non toxique mais acide (acide chlorhydrique HCl) était rejeté à l'atmosphère par des cheminées.

Des tours de lavage mettant en contact l'eau et le phosgène sont également décrites dans les archives concernant Clere & Schwander. Les procédés de destruction utilisés étaient similaires à ceux mis en œuvre aux ateliers d'Aubervilliers et de Vincennes[1708]. « *Les obus sont débouchés dans des chapelles assez résistantes pour résister aux projections accidentelles des produits. Ces chapelles sont reliées à un carneau d'aspiration de fort diamètre par où les gaz dégagés sont conduits, soit à des colonnes de neutralisation lorsqu'il n'y a rien d'utile à en retirer, soit dans des appareils de récupération lorsqu'il y a lieu d'en retirer des produits utilisables. Chaque chapelle est dans un atelier isolé des autres par une cloison. Ces colonnes ou appareils sont toujours suivis d'un ventilateur puissant de sorte qu'une fissure accidentelle se produisant en un point quelconque donnera lieu à une rentrée d'air et non une sortie de gaz. Une cheminée de 10 à 12 m de hauteur évacuera l'air putréfié résiduel et les dernières traces de gaz pouvant y subsister, mais à une teneur assez faible pour ne pas être dangereuse*[1709] ». De tels dispositifs étaient adaptés au traitement des toxiques de guerre liquide (*Ypérite,* bromacétone, etc.) ou gazeux (phosgène, diphosgène). Ce procédé différait de celui mis en œuvre par F.N. Pickett & Fils par l'absence de chauffage des projectiles.

[1707] Les modalités de gestions des effluents résiduaires arséniés ne sont pas connues à ce stade des recherches Historiques.

[1708] Ces sites de production et de chargement d'agents chimiques de combat durant la Première Guerre mondiale ont été mis à contribution après l'Armistice pour la destruction des toxiques.

[1709] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe). Etablissement d'une usine pour le Démontage d'Obus explosifs et toxiques à Muzeray. Enquête de Commodo et Incommodo. Signé : le Préfet de la Meuse. P. Emery. Bar-le-Duc, le 30 avril 1920.

4.4. LA RECUPERATION DE MATIERES A HAUTE VALEUR AJOUTEE DEPUIS LES CHARGEMENTS EXPLOSIFS OU TOXIQUES

4.4.1 L'étain présents dans des toxiques de guerre

S'il est vrai que la très grande majorité des toxiques de guerre collectés après vidage constituent des déchets, non valorisables, à éliminer, affirmer que la totalité des chargements des engins chimiques ne peut prétendre qu'au devenir de déchet de guerre serait abusif. Les sols au droit des anciennes installations de démolition de munitions chimiques de Clere & Schwander, dans le canton de Spincourt, sont localement hautement pollués par l'étain, notamment. Il provient du tétrachlorure d'étain $SnCl_4$, liquide incolore ou jaunâtre (chlore) fumant à l'air, constituant un puissant agent fumigène (encore appelé « liqueur fumante de Libavius » du nom du chimiste allemand Andreas Libavius (1550-1615)) mélangé aux toxiques de guerre liquide[1710]. Il s'agit d'un métal à haute valeur ajoutée que les Britanniques importaient massivement depuis la Malaisie mais qui faisait cruellement défaut aux Allemands[1711]. Lemaire donne une description détaillée de la manière dont Pickett, à Dannes Camiers, a su séparer l'étain de la *Chloropicrine*, par hydratation du tétrachlorure. Cette forme hydratée se séparait naturellement de la *Chloropicrine*. Le $SnCl_4.5H_2O$ obtenu fut ensuite revendu aux établissements Progil de Lyon pour la fabrication de la soie.

4.4.2 Faire des explosifs du champ de bataille des engrais des champs de blé

Les effluents chauds (à plus de 80°C) issus de la solubilisation du chargement des obus explosifs par fusion à l'eau chaude (*wash-out*) étaient dirigés vers une bâche où ils reposaient. Le TNT, faiblement soluble dans l'eau à température ambiante, cristallisait lorsque la solution se refroidissait en-dessous de 80°C et sédimentait au fond du bac d'où il pouvait être récupéré. Lorsque l'explosif était un *Amatol* (mélange de nitrate d'ammonium et de TNT), la solution résiduaire de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) était affinée et envoyée vers des cristallisoirs (un évaporateur Kestner débouchant sur un cristallisoir, cf. Figure 259). Le nitrate d'ammonium (poudre blanche cristalline hygromorphe) était ainsi essoré, concassé puis reconditionné (en sac) pour être vendu comme engrais. Si le TNT était de bonne qualité (sans impureté), il était récupéré, reconditionné (cf. Figure 258) et revendu comme explosif (pour l'agriculture par exemple, pour dessoucher ou démolir des blocs qui entravaient les labours). Souvent, lorsque les chargements explosifs étaient de mauvaise qualité, comme ceux confectionnés par les Allemands à la fin de la guerre, les produits explosifs fondaient difficilement et se mêlaient dans des boues résiduaires. Ces boues étaient récupérées et réservées pour être convoyées vers des aires de brûlage ou servaient à activer les feux de brûlage d'obus ou de fusées.

[1710] L'explosion de projectiles chimiques ne génère que très peu de fumée. Or celle-ci s'avère nécessaire pour juger à distance du point d'impact. Des agents fumigènes, comme le trichlorure d'arsenic ou le tetrachlorure d'étain, sont ajoutés aux toxiques pour compenser la carence en fumée.

[1711] Le sous-sol allemand est pauvre en métaux. Ils ont organisé en compensation des campagnes de collecte du cuivre, de l'étain présents dans les objets du quotidien. Les cloches en bronze sont descendues des clochers pour être refondues.

Figure 258 : Broyage par pilonnage au maillet de bois d'explosifs pour leur reconditionnement en caisse. Usine F.N. Pickett & Fils, D-Factory) de Dannes Camiers[1712].

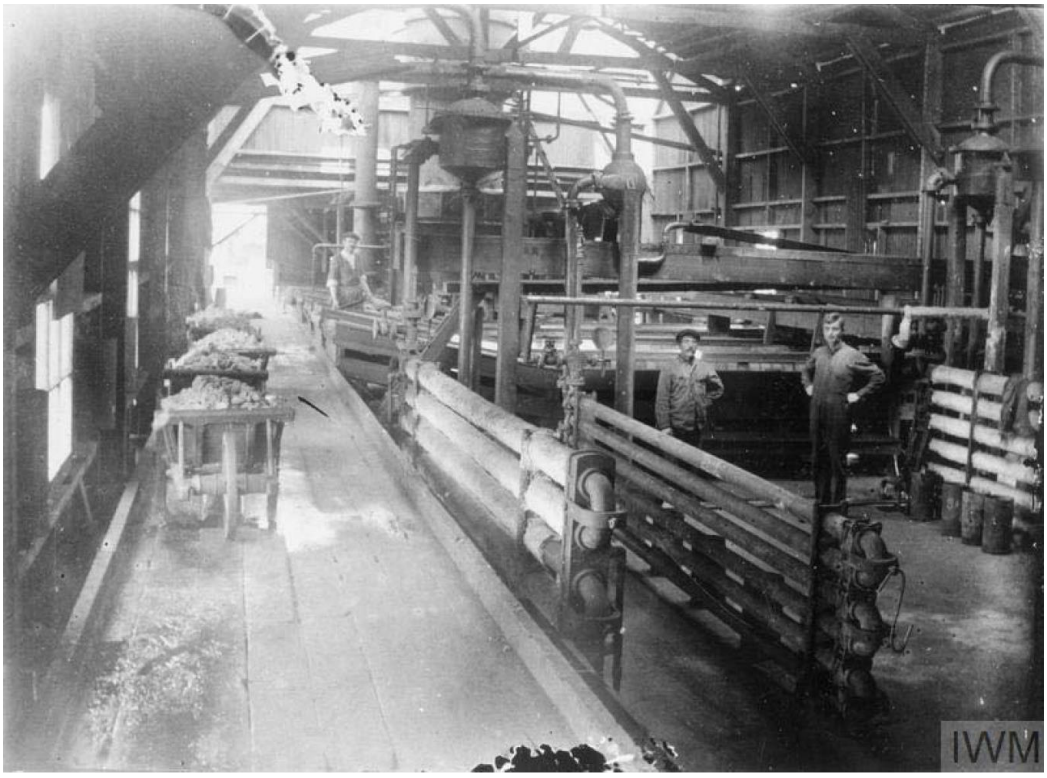


Figure 259: Cristallisoir pour la récupération du nitrate d'ammonium depuis les effluents issus du déchargement d'obus explosifs à Amatol. Usine F.N. Pickett & Fils D-Factory de Dannes Camiers[1713].

[1712] Imperial War Museum, collection John Savage, number Q113258.

[1713] *Ibid,* number Q 113254.

4.5. DESTRUCTION DES OBUS A BALLES ET *SHRAPNELS*

Pour les obus à balles, la première opération consistait à retirer la fusée. Deux moyens furent utilisés au sein de la maison Pickett. Le premier, rudimentaire consistait à décapiter ces engins manuellement, par un coup de masse (en bois ou en bronze) (cf. Figure 260). A Moliens Abancourt dans l'Oise, l'usine F.N. Pickett & Fils *F-Factory* disposait de machines spécialement dédiées à la démolition des obus à balles. La première opération consistait à séparer le projectile de sa cartouche. La cartouche ainsi vidée, le propulseur était collecté puis était expédié par camion sur un terrain de brûlage où il fut détruit. Les cartouches passaient alors sous un pilon. Ensuite, les amorces étaient retirées du projectile et percutées. La fusée dévissée, rejoignait l'atelier de destruction dédié aux fusées. Le tube central contenant la poudre noire était retiré puis vidé. La partie ogivale du corps de l'obus était ensuite sciée par une lourde scie radiale. Enfin, ouverture tournée vers le bas, un marteau pneumatique frappait la base de l'obus expulsant de la sorte, sur un tamis, le chargement de billes et de résine (*Kolophonium*). Les billes passaient au travers des mailles du tamis qui retenaient la résine. Ces billes, généralement faites d'un alliage de plomb (Pb) et d'antimoine (durcissant) (Sb), étaient ensuite dirigées vers des creusets pour y être fondues. Le plomb, affiné, était ensuite coulé en lingotières.

Dans l'usine de Hallschlag (cf. Section 10h du présent manuscrit), des munitions à balles dont le chargement était formé par un mélange de poudre noire et de billes en Pb/Sb, étaient déchargées, après retrait de la fusée, par « cuisson » dans des bains d'eau chaude[1714].

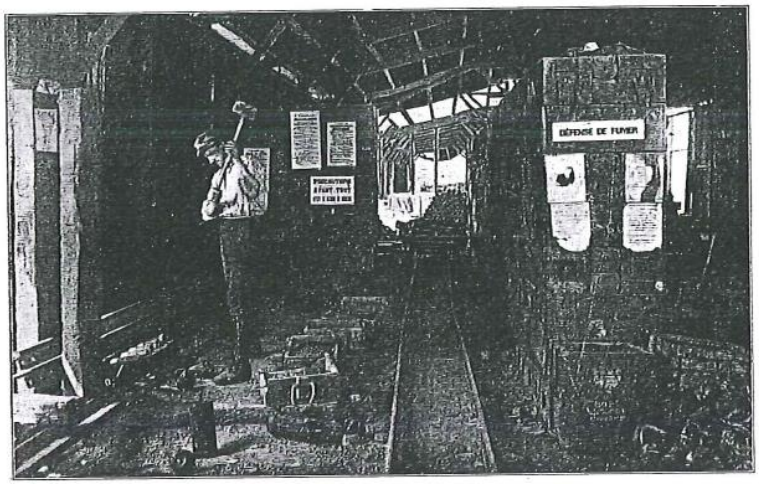


Figure 260 : « Décapitation » A la masse de l'ogive d'un obus à balles pour la récupération des billes de plomb. Usine D-Factory de F.N. Pickett & Fils à Dannes Camiers, à gauche et Usine F-Factory à Moliens, à droite [1715].

[1714] Preuss, J., Eiteberg, F. (1999). *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*, *op. cit.* p.84.

[1715] Imperial War Museum, London, collection John Savage, number Q 113257 / National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives* », *op. cit*. p. 84.

4.6. DESTRUCTION MECANISEE DES GRENADES (*CRUSHING*)

À Fressenenville, dans la Somme, F.N. Pickett & Fils démolit dans la *G-Factory* plus d'un million de grenades à main. Après un tri et une inspection des engins, ceux renfermant un détonateur indémontable étaient dirigés vers un terrain d'explosion pour élimination. Pour les autres, le dispositif de mise à feu était retiré. Les grenades une fois neutralisées étaient ensuite dirigées par une bande convoyeuse vers un broyeur qui cassait les grenades. En sortie, les fragments de métal et d'explosifs étaient séparés par un crible oscillant.

4.7. DESTRUCTION ET RECUPERATION DES MATERIAUX DES ARMES PORTATIVES

La *H-Factory* de F.N. Pickett & Fils, localisée à Saigneville, à proximité de Saint-Valery, dans le département de la Somme, qui neutralisa des quantités considérables d'engins (des millions d'obus *Shrapnels*, de grenades, bombes d'aviations, etc.) se spécialisa dans le démontage des munitions d'armes portatives (*Small Arms Ammunition*)[1716] qui présentaient d'autres difficultés techniques que celles rencontrées par les industriels de la démolition de munitions avec des engins de plus gros calibre, ceux de l'Artillerie. Pickett développa et mit en œuvre des machines mécanisant efficacement la désolidarisation des trois éléments constitutifs de ces munitions (i) les balles en alliage cupro-nickel, (ii) les cartouches en laiton et (iii) les ergols solides (poudres propulsives nitrocellulosiques (NCT ou *Cordite*). Cette mécanisation s'avéra nécessaire vues les quantités phénoménales de munitions à traiter. Soixante munitions étaient placées sur un disque rotatif d'une machine (*rotary de-bulleting machine*), au rythme de 108 unités par minute. Un crochet les agrippait à leur base, les désolidarisait des balles, faisant aussi tomber les paillettes ou fagots des propulseurs dans des bacs d'eau. Ces ergols furent supprimés par brûlage. Les cartouches chargées de *Cordite* présentaient une difficulté particulière car, conditionnée en fagots, elle restait solidaire de la cartouche une fois la balle retirée. Ces cartouches dépourvues de leurs balles étaient grillées dans un four tournant dont la chaleur décomposait les amorces et les ergols. Ces cartouches grillées étaient ensuite inspectées pour s'assurer que l'intégralité des ergols était consumé[1717]. Des dispositifs de neutralisation des amorces des armes portatives similaires à ceux décrits dans ce qui précède furent mis en œuvre dans les installations de neutralisation des munitions d'Hallschalg (Allemagne).

[1716] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives »*, *op. cit*. p.88.

[1717] *Ibid.* p. 89.

5. Résumé et conclusions de la Section 11h

Nulle innovation ou invention majeure ne vint créer une rupture technologique dans la sortie de guerre en ce qui concerne les méthodes et moyens utilisés pour neutraliser les matières explosibles, toxiques de guerre et leur déchargement lorsqu'ils étaient conditionnés dans des munitions hors services, obsolètes et en surplus. Il s'agissait de méthodes, anciennes pour certaines d'entre-elles, déjà connues des militaires, en particulier de l'Artillerie et de l'Ecole Centrale de Pyrotechnie de Bourges, avant la Grande Guerre comme l'éclatement en fourneau ou pétardement ; les Britanniques avaient aussi déjà fait la démonstration sur le terrain en 1917 qu'ils étaient en capacité technique de déconstruire les engins pour ne détruire que le stricte nécessaire et récupérer ce qui était réutilisable. Le déchargement des toxiques de guerre des munitions chimiques ne présentait aucune difficulté lorsqu'opéré dans les ateliers de chargement comme à Vincennes, Aubervillers ou encore Pont-de-Claix.

La neutralisation et le déchargement des projectiles par brûlage à l'air libre (*Open Burning*) était aussi pratiqué mais sur de petites quantités « *in nearly all the Artilleries of all Nations, what pratically burnt up « masses » of explosive that did not surpass some kilogrammes* [1718]».

Mais à la sortie de la Grande Guerre, les tonnages de REG et surplus de guerre étaient tels, que les formules et organisations de neutralisation et de destruction ordinaires ne pouvaient plus être transposées à de telles quantités aussi extraordinaires. Si les circonstances de la guerre forcèrent les militaires associés aux ingénieurs à innover dans le domaine de l'armement en général et des munitions en particulier, la sortie de guerre souleva d'autres questions, toutes aussi complexes, et parfois plus difficiles à résoudre. L'importance exceptionnelle des tonnages à gérer à la sortie de guerre imposa aux opérations de destruction de munitions un saut d'échelle inédit, mais également une compression temporelle, par l'urgence à les effectuer. Les militaires laissèrent alors la place aux ingénieurs pour relever de nouveaux défis techniques.

Le désobusage militaire de 1919 fut partiel et superficiel pour en première priorité sécuriser les reconstructions. La règle en vigueur parmi les artilleurs était le pétardement, impliquant intrinsèquement la perte sèche des matières constitutives des engins. Vers 1920, les Etats, anciens belligérants, trouvèrent dans la sidérurgie et ses progrès une nouvelle filière pour y écouler de façon profitable ces matières si couteuses à produire en temps de guerre, la ferraille notamment des obus par millions et éviter de tout faire partir en fumée. Les fours à réverbères Martin Siemens permettaient dès lors la refonte des vieilles ferrailles pour en faire des aciers performants. Des méthodes furent développées pour optimiser la récupération des matières constitutives des REG qui, n'étant plus voués à l'abandon, perdaient *de facto* leur statut de déchet de guerre.

La neutralisation des REG dispersés ne pouvait plus s'envisager de façon centralisée par le rassemblement des engins vers des usines spécialisées construites en dur et pour durer, vu les tonnages phénoménaux et les risques importants associés, mais dans des ateliers temporaires d'échelle industrielle, montés *ex nihilo* dans les plus brefs délais, associés à des baraquements pour accueillir le personnel. Le choix des emplacements de ces installations de démantèlement de munitions était dicté par la position des dépôts à vider mais aussi par celle des voies de communication en bon état (exemptes des destructions) et adaptées au transport de marchandises lourdes (munitions et produits issus des démolitions). Ces installations ne furent donc pas ouvertes sur le front (à l'exception de l'usine *B-Factory* de Pickett à Westroozebeke), mais dans les anciennes zones des Armées et dans les grands dépôts de base des arrières.

[1718] The National Archives, Kew gardens, London, number TS 36/227. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, 1 place St. Thomas d'Aquin. Paris, 31st March 1924

Une main d'œuvre de circonstance, disponible, dut aussi être identifiée puis recrutée pour l'exécution de ces tâches ingrates, dangereuses, dans un contexte de pénurie de force de travail (en particulier masculine). Cette main d'œuvre affairée aux démolitions, faite de militaires issus des rangs de l'Artillerie aidés par les PG et de travailleurs indochinois jusqu'à la fin 1919, fut majoritairement constituée à partir de 1920 de femmes (pour certaines tâches comme le vidage des poudres et la neutralisation des cartouches) et d'immigrés issus des pays de l'est, de la péninsule ibérique, du Maghreb. La passation des consignes de sécurité claires n'était pas aisée vers ce personnel particulièrement cosmopolite et multilingue, la barrière de la langue formant ainsi un terreau particulièrement accidentogène. Les archives collectées dans le cadre de cette recherche montrent que du personnel encadré par l'Artillerie (Bataillon d'Ouvriers de l'Artillerie) (BAO), ainsi que des soldats du rang, écroués pour mesures disciplinaires furent aussi employés au rebutage de munitions anciennes dans certains ERGMu. Possiblement, ces personnes ignoraient à leur embauche la réelle dangerosité des tâches pour lesquelles elles avaient été recrutées.

Les colonnes de la presse des années 20 décrivent ces communautés d'ouvriers, principalement formées d'étrangers, traversées par de l'indiscipline, la violence et l'insubordination, faute de pouvoir de police, suscitant auprès des populations proches voisines, élus et administrés, de vives inquiétudes et un sentiment d'insécurité. Les délits, viols, vols, violences, port illégal d'armes, états d'ébriétés sur la place publique étaient monnaie courante. Un personnel encadrant était également actif au sein des installations de destruction de munitions : ingénieurs (comme chez Clere & Schwander), directeur d'usine, contremaître, inspecteur militaire de l'Artillerie, etc.

Dès 1919, un premier industriel (Clere & Schwander) fut sollicité par l'Etat (Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) pour démolir par voie contractuelle et industrielle de vastes dépôts ex-allemands, jugés prioritaires par le GQG, à Spincourt, dans la Hardt (par des contrats respectivement de septembre et juillet 1919). Les démolitions ne débutèrent réellement sur le plan opérationnel qu'en 1920, le temps entre signatures et mise en œuvre ayant été consacré aux recrutements, à la construction des installations, mais aussi à la recherche de possibles encadrements administratifs et réglementaires, qui faisaient alors défaut pour ce type d'activités de désobusage alors inédites. Les protocoles opératoires mis en œuvre par Clere & Schwander étaient très similaires à ceux de F.N. Pickett & Fils qui contractualisa avec le Ministère de la Guerre en avril 1920 pour la démolition du dépôt de rassemblement ex-allemand de Trélon dans le Nord. Appuyé par l'ingénieur (et ex-espion) russe Michael Kostevitch, F.N. Pickett fut l'un des instigateurs du processus qui vit glisser, par les exigences des circonstances, les destructions des REG de pratiques artisanales, désorganisées et dangereuses, à une activité industrielle, sécurisée et maîtrisée. Il prôna une « Taylorisation » du désobusage, par la recherche de la performance, du profit et de la sécurité. Il fit probablement de la *C-Factory* de Trélon Liessies son site d'expérimentation et une vitrine « *full-scale* » de ses savoir-faire. L'organisation de Pickett séduisit de toute évidence les donneurs d'ordre.

Le Ministère de la Guerre écrivit à Francis Norman Pickett le 31 mars 1924 au sujet de ses opérations visant la neutralisation des armes chimiques [1719] : "*You asked me my opinion of the breaking down of gas shell. The breaking down of shell, etc. charged with toxic gas constitutes a problem in which […] everybody made a very great mistake. […] This is a fact in all countries, both Allied and otherwise. Mustard gas which everybody was frightened of, thanks to the experiments which you […] kindly made […] became extraordinarily simple. The adjustment of this method was perfected entirely by your goodselves. All other gases caused the gravest misgivings, which you were able to diminish thanks to your admirable organization, for which it was impossible to take money into account. I must tell you that at the present time, your organization has been rendered official in all our similar French Breaking Down Factories (Spincourt, Camp de Châlons, etc.) »*.

Il est ainsi vraisemblable que les méthodes Pickett furent élevées au statut de standards par les ministères en charge de la liquidation des surplus pour la conduite des destructions de munitions par d'autres opérateurs industriels privés en France au début des années 20.

Les grands principes des méthodes de destruction étaient (i) le tri des engins selon leur état, leur chargement, (ii) leur stockage temporaire en alvéoles / lots spécifiques et distincts selon la typologie des engins, (iii) l'usage de méthodes de déchargement sûres et spécialement adaptées à chaque type de chargement.

Les méthodes, moyens appliqués en France et en Belgique, le furent aussi par les industriels du désobusage en Allemagne, occupée, comme libre.

Le pétardement systématisé en tas (fourneaux) fut progressivement abandonné et réservé aux engins dont le démontage pouvait présenter des dangers avérés ou potentiels (engins « douteux »), ceux dont le démontage était jugé trop risqué au regard des bénéfices à en tirer et aux engins découverts sur le terrain et jugés intransportables. Des terrains d'explosion pouvant atteindre de grandes dimensions (plusieurs dizaines d'entonnoir d'explosion, larges et profonds) furent exploités et actifs périodiquement à heures régulières (pour avertir la population). Des solutions d'abandon de munitions irrécupérables par enfouissement et ennoyage (terrestre, maritime) furent aussi étudiées et mises en oeuvre.

Le démontage des engins de guerre fut la solution profitable recherchée lorsque ces engins étaient transportables et jugés suffisamment sûrs pour cette opération. Par cette entremise, un maximum de matières pouvait en toute sécurité être récupéré : fer, acier, fonte des corps des obus, cuivre, zinc des ceinture, plomb des billes d'obus à balle, le laiton des cartouches et fusées, zinc et aluminium de fusée, nitrate et ammonium de certains explosifs, etc.

[1719] The National Archives, Kew gardens, London, number TS 36/227. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, 1 place St. Thomas d'Aquin. Paris, 31st March 1924 « Vous me demandez mon opinion concernant la démolition des obus chimiques. Cette démolition constitue un problème pour lequel tout le monde fit erreur. C'est le cas dans tous les pays, alliés comme les autres. Le gaz moutarde craint par tout le monde, grâce à vos expériences, devint extraordinairement simple (à éliminer). Les ajustements de cette méthode ont été perfectionnés entièrement par vos bons soins. Tous les autres "gaz" ont causé des appréhensions les plus graves que vous êtes capable de réduire grâce à votre admirable organisation pour laquelle la question de l'argent ne pèse pas. Nous vous informons que otre société a été rendue officielle dans tous nos chantiers de démantèlement de munitions (Spincourt, Camp de Châlons, etc.).

Ce démontage systématique suivait un train de tâches dûment agencé pour passer en totale sécurité d'un engin militaire à celui de ferraille inerte inoffensive (câffut) prête à alimenter les fours à réverbère Martin d'où ont été tirées des coulées d'acier, dont on fit selon Pickett « *des socs de charrue*[1720] » et des lampadaires pour reconstruire les territoires du nord de la France et de la Belgique dévastés.

Après dessertissage des projectiles encartouchés (pour récupérer le laiton des cartouches et douilles), les projectiles étaient soumis à l'opération la plus risquée : le désamorçage par le dévissage du couple fusée / gaine d'éclatement (détonateur) au moyen de clés et d'étaux placés dans des cellules blindées.

Les fusées étaient réservées pour être grillées (*Rosting*) dans des fours ou brûlées à l'air libre (*Open Burning* (OB)) dans des tranchées (*Burning Trenches*) sur des terrains de brûlage (*Burning Grounds*).

Les obus explosifs étaient soit brûlés (après ou sans tronçonnage des corps des engins) dans des tranchées (*Burning Trenches*), puits (*Burning Pits*) ou (pour les chargements nitrés nitratés renfermant du nitrate d'ammonium) déchargés par fusion de l'explosif par un jet de vapeur ou d'eau chaude (*wash-out*). Les effluents nitratés étaient collectés pour séparer le TNT des sels de nitrates d'ammonium, qui étaient mis à cristalliser pour en refaire des engrais. Les explosifs nitroaromatiques (comme le TNT), s'ils étaient purs, pouvaient être récupérés, reconditionnés pour un usage ultérieur en génie civil, agriculture (dessouchage, dérochage, etc.). Les matières impures, comme celles couramment rencontrées par les industriels dans les chargements ex-allemands étaient détruites par brûlage (OB).

Les obus à balles (*Shrapnels*) étaient décapités et une fois ouverts, leur chargement de billes, résine ou poudre noire, expulsé mécaniquement par martelage, vers des tamis pour être séparés. Les billes en plomb étaient fondues en lingotières.

Les munitions à chargement chimiques, dont la proportion au sein des arsenaux de la fin de la guerre pouvait être conséquente (supérieure à 30%), étaient celles dont la neutralisation présentait les plus grandes difficultés techniques et sécuritaires (le caractère agressif des chargements ayant accéléré le vieillissement des projectiles). Il s'agissait des projectiles dont le chargement était voué à être détruit, faute de valorisation possible, à l'exception de ceux contenant des agents fumigènes à base d'étain, métal à haute valeur ajoutée qui fut récupéré au moins dans les usines Pickett.

Les chargements liquides (comme l'*Ypérite*, la *Chloropicrine*, etc.) étaient récupérés par vidage des engins (après trépanation des *casings* ou perçage des orifices de remplissage initialement scellés au plomb) pour être infiltrés dans des puits perdus (et neutralisation à la chaux) ou pour être détruits dans des fours spéciaux. Parfois encore ils étaient incinérés dans les obus dans des tranchées de brûlage. Le brûlage en tranchées fut, au regard des archives consultées, la seule méthode pour décharger les obus ex-allemands à arsines solides (obus à *Croix bleue*).

Les méthodes de brûlage des munitions proposées par Kostevitch furent controversées par les chimistes britanniques en poste au sein de l'entreprise Pickett, mais aussi externes à l'entreprise, et par le célèbre chimiste allemand dont les travaux faisant jusqu'alors référence en matière de poudres et explosifs, le Professeur Docteur Hermann Kast et son opus « *Anleitung zur chemischen und physikalischen Untersuchung der Spreng- und Zuendstoffe* » (1909, Braunschweig).

[1720] National Archives, Kew Gardens, London. *Mayfair.* « *F.N. Pickett et Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives* », p. 32. *op. cit*

Le Ministère de la Guerre, Service des Munitions intervint et du mettre fin à cette controverse le 2 février 1921 et les méthodes de Kostevitch furent appliquées avec succès lorsque les règles édictées dans ce but étaient strictement respectées[1721].

Plus de 2,5 millions d'obus, de mines, grenades en tout genre furent déchargés de leurs explosifs sans la moindre explosion durant les années 1921, 1922 et 1923 selon ces méthodes.

Les obus chimiques à chargement gazeux (phosgène, etc.) étaient ouverts et chauffés pour provoquer l'expulsion violente des gaz en dehors des corps des obus, les gaz étant ensuite dirigés vers des fours ou des colonnes de neutralisation (par l'eau).

Pickett exploita le potentiel de l'environnement naturel de son plus gros chantier, celui du bord de mer de Dannes Camiers dans le département du Pas-de-Calais (avec 110 000 tonnes de munitions) pour faciliter les démolitions

Les méthodes et moyens de rebutage et de déchargement des Restes Explosifs de Guerre développés et optimisés dans l'entre-deux-guerres en France, en Belgique ou encore en Allemagne constituèrent encore des bonnes pratiques lors des opérations de désobusage, déminage et débombage entreprises dès 1945. Certaines d'entre elles sont encore en vigueur dans les pays militarisés et sur les théâtres des opérations des conflits contemporains. Seules les finalités des démolitions peuvent changer comparativement à celles opérées post 1914-1918. L'approche combinant le tri préalable des engins (consécutivement à des identifications visuelles et/ou par des inspections RX, par spectrométrie neutronique, etc.) puis leur orientation vers les solutions techniques de neutralisation adaptées, efficaces et sûres constitue encore de nos jours l'épine dorsale de la gestion des Restes Explosifs de Guerre.

.

[1721] Kostevitch H.E. & P. *Burning Ground*, Paris, 1927.op. cit. p. 15.

Section 12h
Destruction des REG de l'entre-deux-guerres. Inventaire des sites et bilan des tonnages détruits

1. Introduction de la Section 12h

1.1. OBJECTIFS

Un inventaire le plus exhaustif possible des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres a été établi à la demande du Ministère en charge de l'environnement (lettre de saisie du 31 juillet 2015) afin de restaurer la mémoire de ces sites et éviter si possible les situations problématiques induites par la découverte fortuite de pollution (comme en 2015 avec le site Clere & Schwander du canton de Spincourt en Meuse). Cet inventaire permet aussi d'avoir une vision cartographique de la géographie des opérations de destruction de Restes Explosifs de Guerre de l'entre-deux-guerres.

1.2. METHODES ET MOYENS

Cet inventaire s'appuie sur l'exploitation et l'analyse (i) des archives rassemblées dans le cadre de cette recherche (archives nationales civiles et militaires, archives départementales, archives internationales, archives de la Bibliothèque nationale de France, archives issues de collections privées, etc.) et (ii) de photographies aériennes anciennes. L'existence de certains sites a pu être confirmée par des reconnaissances de terrain. Il a été désigné par « site » un lieu géographique où des opérations de destruction de munitions ont été identifiées. Le site est qualifié par le nom de la commune sur le territoire de laquelle il a été identifié. Certaines installations de grande taille empiètent sur plusieurs communes. Dans cette situation, il y a autant de sites que de communes concernées. Les sites ont été positionnés sur la carte de la France métropolitaine (cf. Figure 262) non pas sur la base des coordonnées géographiques exactes des sites (la géolocalisation étant aussi, pour certains sites, difficile à établir), mais en les centrant sur le périmètre des territoires des communes sur lesquels les sites ont été identifiés.

1.3. POSSIBILITES ET LIMITES

Cet inventaire couvrant le territoire de la France métropolitaine ne prétend à aucune exhaustivité du fait (i) du caractère parcellaire des archives, (ii) de l'absence d'enregistrements documentaires pour certaines opérations de destruction (en particulier celles entreprises hors cadre contractuel avant 1920), (iii) d'une couverture du territoire métropolitain que partielle par les missions photographiques aériennes dans l'entre-deux-guerres et (iiii) de l'absence d'empreinte au sol laissées par certaines destructions dans certains contexte géologiques (sols en roches indurées) et/ou l'effacement de ces empreintes par des travaux de remise en état des sols post-exploitation.

Les coordonnées géographiques des sites, lorsqu'elles existent ont volontairement été retirées du présent manuscrit pour des raisons de sureté (certains sites montrent ou sont susceptibles de montrer des engins de guerre à l'affleurement).

Ont été écarté de cet inventaire les sites historiques de destruction de munitions présents sur d'actuelles emprises militaires (terrains de manœuvre et d'exercice actifs), comme ceux du camp de Suippes (département de la Marne, avec les sites de Tahure, Ripont), et du camp de Sissonne (usine de Joeffrécourt). L'inventaire fait l'objet du rapport public intitulé « *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales. Rapport final* » de septembre 2022 et référencé BRGM/RP-68476-FR (http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-68476-FR).

2. Distribution geographique des sites

A la date de décembre 2018, le BRGM a identifié 189 sites de destruction de munitions exploités dans l'entre-deux-guerres sur le territoire métropolitain (cf. Figure 262). Le graphique et la carte suivants montrent la distribution géographique de ces sites selon les différentes régions françaises. L'analyse statistique des données montre par ailleurs qu'environ 80 % des sites identifiés ont pu être correctement géo-localisés. Enfin, les données chiffrées relatives aux tonnages et/ou aux quantités de munitions détruites par site sont rares et souvent parcellaires ; des données ont pu être collectées pour 30 % des sites versés à l'inventaire, ce qui constitue une réelle limite à l'étude, notamment en vue d'une appréciation des éventuels impacts environnementaux liés à ces différents sites.

Les grandes régions des Hauts-de-France (44% des sites) et Grand'Est (49% de sites) rassemblent à elles seules près de 93 % des sites de destruction de munitions identifiés (cf. Figure 261). Il s'agit en particulier (dans l'ordre décroissant, et à l'échelle départementale) des départements de la Meuse (50 sites), de l'Aisne (31 sites), de la Moselle (19 sites), du Pas-de-Calais (18 sites), de la Somme (16 sites), du Nord (15 sites) et de la Meurthe-et-Moselle (10 sites).Le nombre et la densité des sites est directement en relation avec les tonnages détruits sur ces territoires (2-3 millions de tonnes dans l'entre-deux-guerres, dont près de 80 % dans les Haut-de-France et en Champagne). Il s'agit des territoires des anciennes 1re, 2e et 6e Régions militaires où se concentrèrent durant la guerre l'essentiel des combats d'Artillerie les plus violents et les plus intenses. Ce sont aussi des départements déjà fortement militarisés avant la Première Guerre mondiale. A noter que le nombre de sites découverts dans le Nord-Pas-de-Calais, en Picardie et en Lorraine est peu ou prou proportionnel aux tonnages visés pour destruction en 1922 dans les respectivement 1re, 2e et 6e Régions militaires.

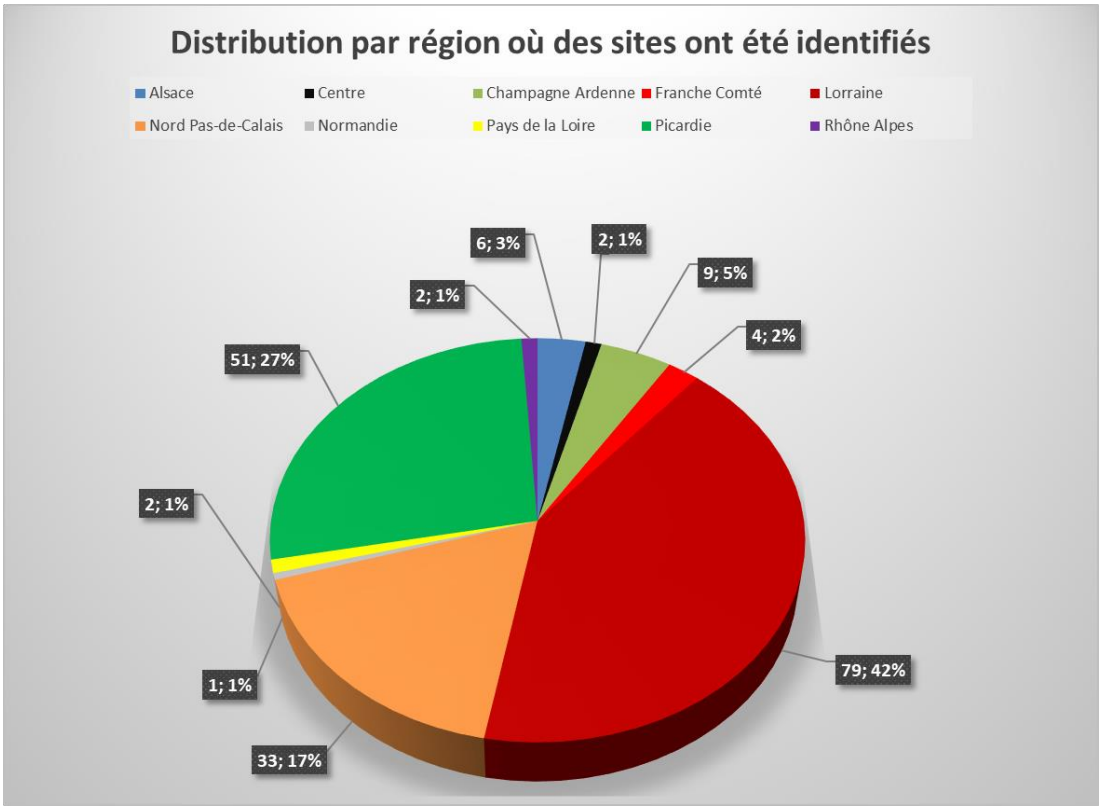


Figure 261 : Distribution géographique des sites de destruction de munitions de la Première Guerre mondiale inventoriés par le BRGM (état décembre 2018).

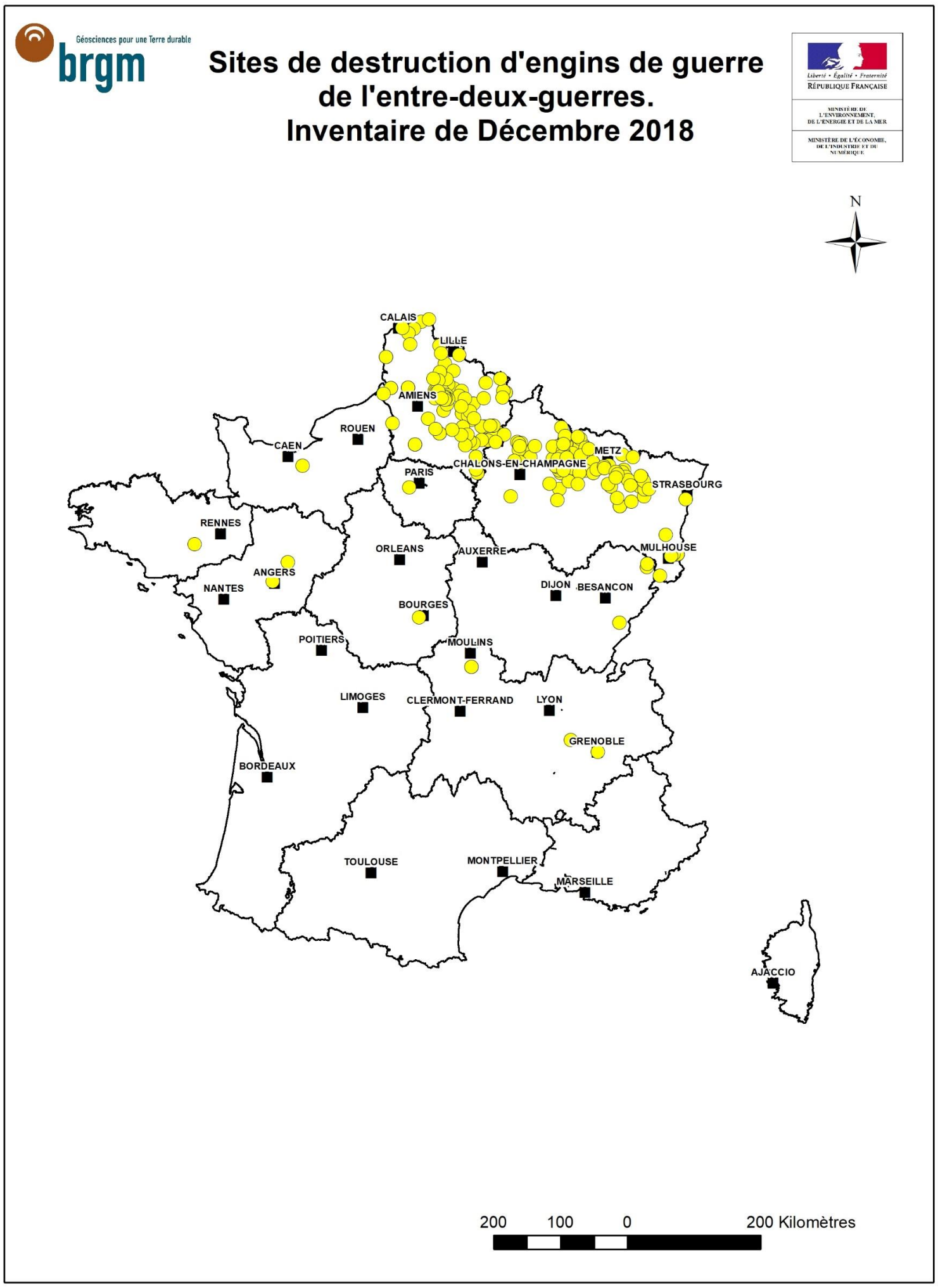


Figure 262 : Carte de la distribution des sites de destruction de munitions de la Première Guerre mondiale en France métropolitaine.

3. Typologie des sites identifies

3.1. MODALITES DE DESTRUCTION

On constate que plus du trois quarts des sites identifiés dans le cadre de cet inventaire correspondent à des terrains d'explosion (TE) dont les dimensions sont très variables, allant de quelques gros entonnoirs isolés à des ensembles rapprochés d'enfilades compactes d'entonnoirs de pétardement (cf. Figure 263). Les entonnoirs de pétardement peuvent être vastes (10 à 20 m de diamètre et profonds de plus de 5 m). Les dimensions des entonnoirs et leur nombre sur un même terrain d'éclatement sont proportionnels aux tonnages détruits sur le site. Les terrains d'éclatement notoires identifiés dans le cadre de la présente étude sont par exemple ceux de Loison (exploitant Clere & Schwander), exploité jusqu'en 1924, de Vaudoncourt (exploitant Armée française, puis réoccupé par les ateliers Clere & Schwander) en Meuse, de Fampoux (exploitant Léon Berge) (cf. Figure 264), exploité jusqu'aux termes de la Seconde Guerre mondiale (département du Pas-de-Calais), de Saint-Pol-sur-Mer (exploitant inconnu) dans la proche banlieue de Dunkerque (département du Nord). Les usines de destruction de munitions par démontage représentent 9 % des sites. Ces sites sont désignés « multimodaux » lorsqu'ils comportent aussi par ailleurs un ou plusieurs terrains d'éclatement sur le même site (10 % des sites). Ce sont donc une trentaine d'installations industrielles de destruction de munitions, qui ont été identifiées par le BRGM dans le cadre de l'inventaire.

A noter, à titre de rappel, que des munitions anciennes datant de la Première Guerre mondiale, dont le démontage ne s'avéra pas faisable et/ou profitable, furent aussi (i) coulées en mer (ennoyage maritime), ou dans des plans d'eau (ennoyage terrestre comme à Avrillé ou Gérardmer) ou (ii) enfouies (comme dans le gouffre de Jardel).

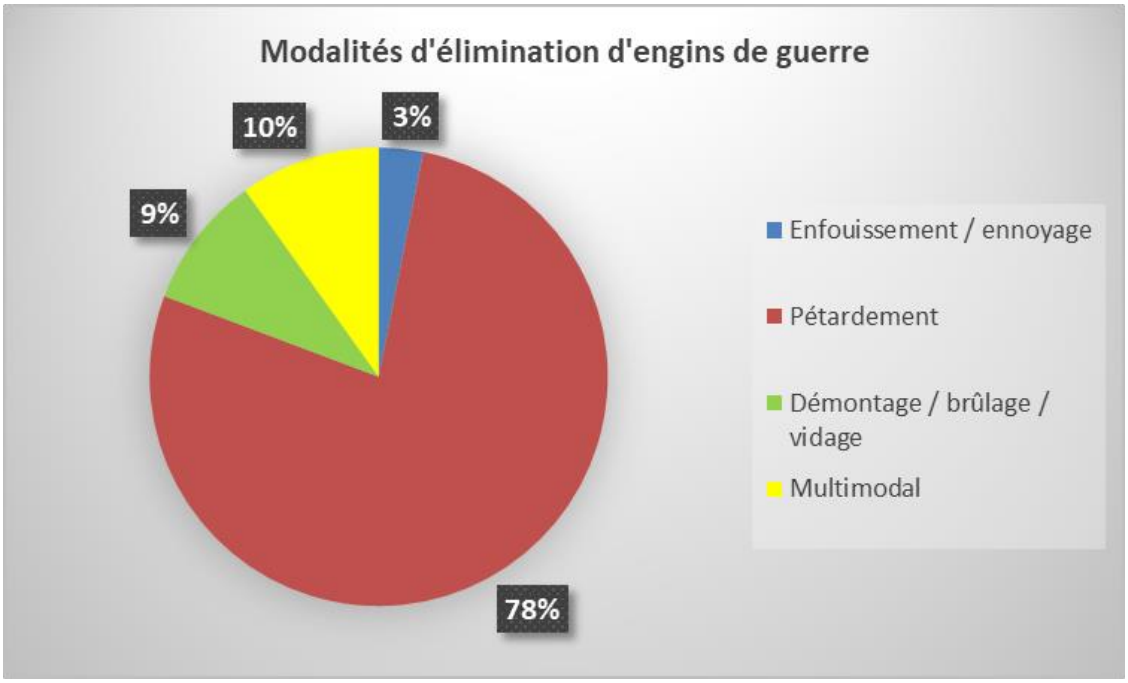


Figure 263 : Modalités d'élimination des engins de guerre de la Première Guerre mondiale.

3.2. EXPLOITANTS CONCERNES

L'industriel originaire d'Arras, Léon Berge occupa, avec 19 sites, une place de première importance dans l'élimination des engins de guerre de la Première Guerre mondiale ; il procéda principalement par pétardement (comme à Fampoux dans le Pas-de-Calais). Il occupa une position de quasi-monopole de la récupération des engins de guerre dans la 1re Région militaire dans l'entre-deux-guerres. F.N. Pickett & Fils est l'entrepreneur, actif dans l'entre-deux-guerres, qui posséda le plus grand nombre d'usines (13 au total) pour démolir 330 000 tonnes de projectiles rachetées au *Disposal Board* dans le nord de la France, auxquels il convient de rajouter 28 000 tonnes et 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes des anciens dépôts respectifs de Conteville Domléger (département de la Somme) et de Trélon Liessies (département du Nord). La plus grosse usine (*D-Factory*) était implantée à Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais) pour la destruction de 110 000 tonnes de projectiles en tout genre avec une capacité qui culmuna à 1 000 tonnes / semaine. Débuté à Trélon en 1920 (*C-Factory*), l'activité de cet industriel semble s'être arrêté en France avec les destructions d'engins chimiques entre 1926-1928 à l'emplacement de la « Place à gaz » (Meuse). Les autres démolisseurs industriels de l'entre-deux-guerres étaient les suivants (liste non exhaustive) :

- **Savot Frères & Cie** (usines d'Albert (département de la Somme), de Coucy-le-Château-Auffrique (département de l'Aisne), de la Chapelle Saint-Ursin (département du Cher) ;

- **Ricome** (exploitant du site de Douaumont en Meuse)[1722] ;

- **Clere & Schwander**. Cet industriel a exploité deux importants sites de destruction de munitions chimiques et conventionnelles, répartis sur plusieurs communes (d'où un décompte affiché de sept sites) dans le canton de Spincourt (département de la Meuse) et dans la forêt de la Hardt (département du Haut-Rhin) ;

- **Marmier, Aigret & Sauron** qui a exploité des ateliers de destruction d'engins de guerre en Meurthe-et-Moselle et possiblement sur le camp de Châlons, actuel camp de Mourmelon (département de la Marne) ;

- **La Société Lorraine de Produits Industriels (SLPI)** ayant entamé des destructions de munitions dans son chantier du Bois de l'Hôpital à l'est de Metz (département de la Moselle) puis co-exploitant de l'usine de liquidation de REG de Kelsterbach (Land de Hesse, Allemagne) ;

- **La Société Alsacienne de Produits Métallurgiques,** ayant possiblement exploité un chantier à La Gélinerie, commune d'Azannes-et-Soumazannes dans le canton de Spincourt (département de la Meuse). Cette société intervient en sous-traitant pour la SLPI au Bois de l'Hôpital.

Pour 58 % des sites identifiés dans le présent inventaire, l'opérateur n'est pas connu. Les sites ayant été spécifiquement exploités par ces sociétés privées représentent environ la moitié des sites (soit 60 sites) avec exploitants identifiés. Environ 20 sites ont été exploités spécifiquement par une autorité militaire (Armée française, AEF, BEF). Certains sites initialement exploités par une autorité militaire ont été réinvestis (à compter de 1920) par des opérateurs privés. Les chantiers de destruction d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres furent exploités sur des terrains actuellement civils et d'autres sur des terrains encore restés militaires (comme ceux des camps de Suippes dans le département de la Marne, le camp de Sissonne dans le département de l'Aisne, etc.).

[1722] Le site Ricome du Ravin du Chaufour, attenant à celui du Helly (Douaumont, département de la Meuse). a démoli industriellement des munitions dans l'entre-deux-guerres puis à la fin de la Seconde Guerre mondiale. Le site a ensuite été réinvesti vers 1965 par les troupes américaines de l'OTAN stationnées en Meuse pour démolir tous les engins de guerre présents sur leurs emprises militaires.

4. Inventaire des sites de destruction de munitions chimiques

Les sites de destruction de munitions chimiques de la Première Guerre mondiale, exploités dans l'entre-deux-guerres et identifiés dans le travail d'inventaire sont les suivants :

- **Trois entités du complexe de désobusage Clere & Schwander dans le canton de Spincourt** (département de la Meuse). sur la période 1919-1924, pour la destruction par pétardement, démontage, brûlage, vidange et neutralisation des chargements d'environ 1 500 000 projectiles chimiques et 300 000 obus explosifs[1723]. Cet exploitant a aussi procédé durant la période d'exploitation du chantier de Spincourt, à la destruction de 8 000 tonnes de projectiles chimiques allemands dans la **Forêt de la Hardt,** à l'est de Mulhouse (département du Haut-Rhin)[1724] ;
- **Le site F.N. Pickett & Fils dit de la « *Place à gaz* »** sur la commune de Gremilly (département de la Meuse) pour l'élimination par brûlage de 200 000 obus chimiques allemands (majoritairement des engins à *Croix bleue* chargés en arsines vomitives), entre 1926 et 1928 ; ce chantier était installé en forêt de Spincourt à proximité d'un chantier de désobusage établi à proximité de la ferme de La Gélinerie (commune d'Azannes-et-Soumazannes) où des opérations de destruction de munitions chimiques ont vraisemblablement aussi été réalisées vers 1925 et 1926 ;
- **Les usines F.N. Pickett & Fils** de Trélon Liessies (département du Nord), Dannes Camiers (département du Pas-de-Calais), Saigneville et Conteville Domléger (département de la Somme) ;
- Destruction de munitions chimiques et de munitions explosives à **Brandeville** (département de la Meuse) vers 1929, possiblement opérées par Léon Berge (les archives du Service Historique de la Défense, site de Vincennes, précisent que cet entrepreneur n'avait pas encore totalement honoré son contrat en 1930 pour la destruction de munitions chimiques en Meuse)[1725];
- A **Resson-sur-Matz** (département de l'Oise), il a été procédé à la destruction sur place, suite à l'incendie et l'explosion d'un dépôt de munitions, des engins projetés et/ou endommagés. En 1921, le dépôt en question aurait totalisé: 15 000 obus de 77 mm dont la moitié chimique, 22 000 obus de 75 mm dont la moitié d'obus chimiques, 3 100 obus de gros calibre dont la moitié d'obus chimiques. 4 300 bombes de 58 T (perchloraté)[1726] ;
- Destruction de munitions chimiques entre les années 20 et possiblement au cours des années 30 au **Ravin du Helly à Douaumont** (département de la Meuse). De nombreux Articles de presse, numérisés et conservés à la Bibliothèque nationale de France, confortent l'existence d'un chantier de désobusage visant des munitions chimiques au Ravin du Helly.

[1723] Archives Départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82.

[1724] Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402.

[1725] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3 – 674.

[1726] Archives Départementales de l'Oise, site de Compiègnes, cote MP 1583. Préfecture de l'Oise. Police des RBC. Secteur de Compiègne. Le Brigadier Wautrin. Commandant la Brigade de police des RDG de Ressons-sur-Matz à Monsieur me Commissaire Spécial, Chef de Secteur au Palais de Compiègne. Au sujet de l'explosion d'un dépôt de munitions à la côte 115, territoire de la commune de Ressons-sur-Matz. Ressons-sur-Matz, le 12 juillet 1921. Signé : Wautrin.

Ainsi, le *Bulletin Meusien* du 14 mai 1921 relate un accident en ces termes « *Vers 18 heures, l'Artificier Ponceau et le canonnier Delaunay procédaient au déchargement du troisième camion, sur le champ d'explosion, lorsque, par suite d'une fausse manœuvre de Ponceau, un obus de 150 à gaz asphyxiants et muni d'une fusée très sensible, tomba, sur d'autres obus déchargés et éclata*[1727].

Un autre accident se produisit le 06 août 1927 dans le chantier de destruction du Helly lors de l'explosion accidentelle d'un obus, lors de la préparation d'un fourneau d'éclatement. Enfin le *Bulletin Meusien* du 14 mai1932 évoque un accident survenu à des ouvriers de l'entreprise Meyer & Delaire au chantier du Ravin du Helly, qui s'étaient affairés au dévissage des fusées d'obus[1728] ;

- **Savot Frères & Cie** procèdent au brûlage d'obus chimiques et conventionnels (un total de 60 000 engins) en 1930 au Bois du Quesnoy à Bailleul-sur-Thérain (département de l'Oise)[1729] ;
- Brûlage d'obus chimiques français par **Bouxin à l'ERGMu de la Ferté-Hauterive** (département de l'Allier)[1730] ;
- Ateliers de déchargement **Aigret & Sauron d'Einvaux** (département de la Meurthe & Moselle)[1731].

Ces sites restent rares et exceptionnels, et représentent moins de 10 % des sites identifiés dans le cadre de la présente étude. Le nombre restreint de site tient aussi certainement en partie au fait que les munitions chimiques furent rassemblées sur des centres spécialement dédiés au nombre limité.

A noter que deux vastes terrains d'éclatement ayant très probablement neutralisé des engins à chargement chimique ont été identifiés sur photographies aériennes anciennes (datées de 1948) à Mancieulles Val-de-Briey. Un terrain d'éclatement a aussi été repéré sur imagerie LiDAR à proximité de Saulnes, en Wallonie, ainsi que de vastes dépressions circulaires (antérieures à 1930) sur le plateau situé entre Saulnes et la frontière luxembourgeoise, pouvant correspondre à des entonnoirs de pétardement. Des informations communiquées par les archéologues luxembourgeois relatent la découverte de projectiles et de nombreux fragments de munitions dans ce secteur. La destruction de munitions chimiques sur ces sites paraît ici vraisemblable.

Ce travail d'inventaire a été motivé par les risques de découvertes fortuites de pollution en lien avec des sites de destructions massives d'engins de guerre qui auraient échappé aux processus de conservation de la mémoire. Pour clore cette section, il convient d'analyser les causes les plus probables à l'origine de l'effacement mémoriel ou de l'absence d'inscription dans la mémoire collective de site de désobusage d'échelle pourtant industrielle.

[1727] Bibliothèque Nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 14 mai 1921

[1728] Bibliothèque Nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 14 mai 1932.

[1729] Archives Départementales de l'Oise, site de Compiègnes, cote MP111. Le Capitaine Eveloy, Chef du Service du Contrôle du désobusage, 2 rue Lescouvé à Amiens à Monsieur le Préfet de l'Oise à Beauvais. Dépôt de Bailleul s/Therain. Amiens, le 23 octobre 1930.

[1730] Archives Départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 2 M 2057. Ministère de la Guerre, Direction, 2e Bureau. Marché de gré à gré pour la démolition de d'obus spéciaux stockés à l'entrepôt de réserve générale de la Ferté Hauterive. Le 3 septembre 1923.

[1731] Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote B-29713. 20e Région, Artillerie. Le Général Aldebert, Commandant par interim l'Artillerie du 20e Corps d'Armée à Monsieur le Général Commandant le 20e Corps d'Armée. 4e Bureau. Nancy le 23 août 1921.

5. Invisibilisation des activités et opérations d'élimination des REG de l'entre-deux-guerres

5.1. DES ENREGISTREMENTS ARCHIVISTIQUES LACUNAIRES ET ATOMISES

Les archives ne donnent que des informations partielles et parcellaires sur les opérations de démolitions de munitions et REG de l'entre-deux-guerres. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer cet état de fait.

Premièrement, ce type d'activités d'éradication des REG était inédite à cette échelle, et ces opérations ont dû être engagées dans l'urgence dans un contexte de sortie de guerre, de réorganisation des organes décisionnels de l'Etat dans une transition, elle aussi inédite, entre une administration omnipotente militaire du temps de guerre et celle à restaurer, civile, du temps de paix. Il n'existait donc dans cette période ni cadre administratif, ni destinations claires pour enregistrer et classer les documents produits par les parties prenantes aux opérations de liquidation des REG. Les archives collectées et exploitées dans le cadre de cette recherche furent de toute évidence ainsi dispersées dans de très nombreux fonds, séries et sous-séries des archives nationales et départementales. Aucun fond d'archives n'a centralisé les documents relatifs à ces opérations. Cette dispersion reflète celle de la gouvernance des opérations déléguées par le Ministère de la Guerre au Commandement de l'Artillerie des différentes Régions militaires concernées (principalement les 1re, 2e, 5e, 6e et 20e Régions). Les services instructeurs, et opérateurs du désobusage et de la récupération des REG étaient très nombreux, civils et militaires, avec souvent des rôles et responsabilités aux contours flous, ce qui contribua à disperser les archives. Cette atomisation des sources a vraisemblablement contribué à invisibiliser dans l'historiographie officielle de la Grande Guerre, ces opérations de liquidations des REG pourtant essentielles et préliminaires à toutes reconstructions, pourtant, elles, largement traitées.

Deuxièmement, il est vraisemblable que durant la phase du désobusage pilotée et effectuée directement par l'autorité militaire, peu d'écrits aient été produits sur ces opérations. Les opérations de désobusage devinrent plus visibles et lisibles à compter de 1919-1920, années durant lesquelles furent engagées les premières opérations de destruction des REG et de liquidation des surplus déléguées par voie contractuelle à des opérateurs privés. Les archives produites étaient alors principalement des correspondances et documents administratifs et contractuels entre les différents acteurs, établies à la faveur du contrôle de l'exécution des différents contrats. Ces corpus furent versés aux archives du Service Historique de la Défense (SHD), au Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF) et dispersées dans les archives départementales dans les Régions militaires concernées. Les archives relatives aux activités de F.N. Pickett & Fils en France et en Belgique furent centralisées aux archives civiles du *National Archives, Kew Gardens*, à Londres (Royaume uni) et au Centre de documentation historique des forces armée à Evere (Belgique).

Les dysfonctionnements endémiques dans l'organisation du désobusage et de la liquidation des stocks et surplus, la banqueroute du plus important des acteurs de l'élimination des engins de guerre, Francis Norman Pickett, donnèrent lieu à des enquêtes administratives par les Services de l'Artillerie et le cabinet d'audit *Price, Waterhouse & Cie* mandaté par le *Disposal Board.* Les rapports et correspondances qui en découlèrent contribuèrent significativement à tracer les activités des industriels du désobusage dans le contexte socio-politique et économique dans lequel ils furent amenés à évoluer.

Enfin, il convient de signaler les pertes d'archives au cours des destructions de la Seconde Guerre mondiale (des archives militaires allemandes lors des bombardements américains et britanniques sur Leipzig du 4 décembre 1943 et du 7 juillet 1944, des archives de Laon lors des bombardements de 1944, etc.). Une partie des archives françaises relatives à la Grande Guerre et à la sortie de guerre resta aussi jusqu'en 2016, inaccessible. Il s'agit du « Fond de Moscou », un corpus d'archives policières et militaires prit à Paris par les Allemands après la défaite de 1940, transféré à Berlin, pour être ensuite à nouveau prit et transporté à Moscou par les forces soviétiques qui s'emparèrent de la capitale allemande en mai 1945. Le fond fut rendu à la France en 1994 et 2004. Il fut consulté dans le cadre de cette recherche au moment où il fut rendu progressivement publique.

5.2. AMNESIE COLLECTIVE OU REFOULEMENT MEMORIEL ?

Les opérations de désobusage de l'entre-deux-guerres auraient laissé peu de traces dans la mémoire collective. Subsistent des bribes mémorielles individuelles et locales.

Mr Yvon, 93 ans au moment de la rencontre, domicilié à Domléger et interviewé, explique que son père lui rapportait les accidents survenus au sein de l'usine F.N. Pickett & Fils de Conteville, ayant eu accès à ces informations par sa position de menuisier, seule personne à même de construire des cercueils pour inhumer les victimes.

Dans la Meuse, à Vaudoncourt, certains se souviennent encore de « *vastes cratères de toutes les couleurs dans lesquels on allait jouer* » sans savoir de quoi il s'agissait « *on récupérait les fioles en verre dont on se servait comme encriers à l'école* ». En apprenant qu'il s'agissait de fioles d'arsines d'obus à *Croix bleue* allemands la réaction a été *« je comprends mieux maintenant pourquoi on avait toujours mal à la tête*[1732] » sans qu'il put être fait un lien de causalité catégorique entre les fioles et les céphalées.

La mémoire apparaît existante, par bribes, vascilliante, mais biaisée. A Trélon et Liessies, l'existence des clairières dépourvues de végétation du Bois l'Abbé et du Parc Jeannette, est connue par la population locale, mais dans l'imaginaire, la « stérilisation » des sols aurait été une conséquence de l'incendie des dépôts de munitions provoqué par les Allemands lors de leur retraite en 1918, sans se douter que cette absence de végétation est due à la (phyto)toxicité des métaux lourds introduits dans ces terrains par les opérations de brûlage de REG par F.N. Pickett & Fils au début des années 20.

D'autres traces persistent aussi dans la toponymie de lieudits, comme par exemple au « Bois Brûlé », un boqueteau contourné par le labour et isolé au milieu des champs à Conteville, et correspondant à un ancien terrain de brûlage de REG. Quant à l'origine du nom de la « Place à gaz », pour désigner cette clairière en forêt de Spincourt, et qui indique à la fois un lieu précis (la « Place ») et ce que s'y produisit (l'éradication des obus à « gaz » allemands »), elle n'est pas connue. Cette dénomination aurait été déjà employée localement en Meuse en 1949[1733].

S'agit-il d'une amnésie collective ou d'un refoulement mémoriel ?

Les archives de l'entre-deux-guerres collectées à la faveur de cette recherche montrent que les anciens dépôts de munitions, et en particulier lorsqu'ils étaient attribués à l'ancien ennemi ex-allemand, étaient indésirables, considérés comme des verrues dangereuses, issues d'un temps de guerre et d'une occupation que ces populations dans un nouveau temps de paix à inventer auraient voulu être reléguées au passé.

[1732] Communication personnelle.

[1733] *Ibid.*

Mais ces dépôts par leurs explosions accidentelles, leur présence et l'occupation des terrains privés qui avaient sèchement été réquisitionnés, et dérobés par l'occupant, imposèrent une toute autre réalité. La guerre ne semblait toujours pas terminée. Les Allemands menaçaient et occupaient toujours.

Détonations, éclairs, fracas, projections d'éclats et de terre accompagnant l'éradication des dépôts de munitions dans les années 20 firent rejouer en France comme en Grande Bretagne d'anciennes représentations, celles de la guerre, infectées par celles des effets délétères et spectaculaires de l'arme chimique. Les sites de liquidation des REG furent ainsi possiblement mis au ban, écartés de la société car ne coïncidaient plus avec ses aspirations. La presse de l'entre-deux-guerres se fit l'écho du climat délictuel et de l'espace de non droit, régnant dans ces sites, et des multiples accidents souvent mortels, ce qui contribua certainement à stigmatiser encore plus l'opinion sur ces sites où pourtant, avec du recul, des femmes et hommes étaient employés à éradiquer un arsenal, pour le profit, mais qui allait sauver bien plus de vies que celles que cela a coûté.

Ensuite, les archives montrent que la main d'œuvre immigrée et étrangère était fortement représentée dans les personnels affairés aux opérations qui de surcroît étaient exécutées dans l'urgence, sur de courtes périodes de temps (quelques mois à quelques années). La présence de cette population cosmopolite de travailleurs étrangers, présente temporairement dans les chantiers de désobusage, à l'écart des communautés villageoises, n'a possiblement pas marqué l'histoire locale.

Les installations de démolition, démontage des REG, temporaires, faites de baraquements et structures en bois rudimentaires, souvent démontées à l'échéance des opérations, n'ont généralement laissés ni traces ni ruines qui auraient pu être encore conservées et visibles de nos jours, à l'exception des terrains de brûlage visibilisés par leurs effets toxiques sur la végétation.

Les terrains d'explosion, notamment ceux ouverts en plein champ furent généralement remblayés pour la remise en culture des terrains ; d'autres ont été naturellement envahis par la végétation, les phénomènes d'érosion et de solifluxion contribuant pour leur part à combler partiellement les vastes dépressions. C'est ainsi que ces sites s'effacèrent progressivement des paysages, à l'instar des vastes terrains d'éclatement de Fampoux, et aussi possiblement des mémoires (cf. Figure 264).

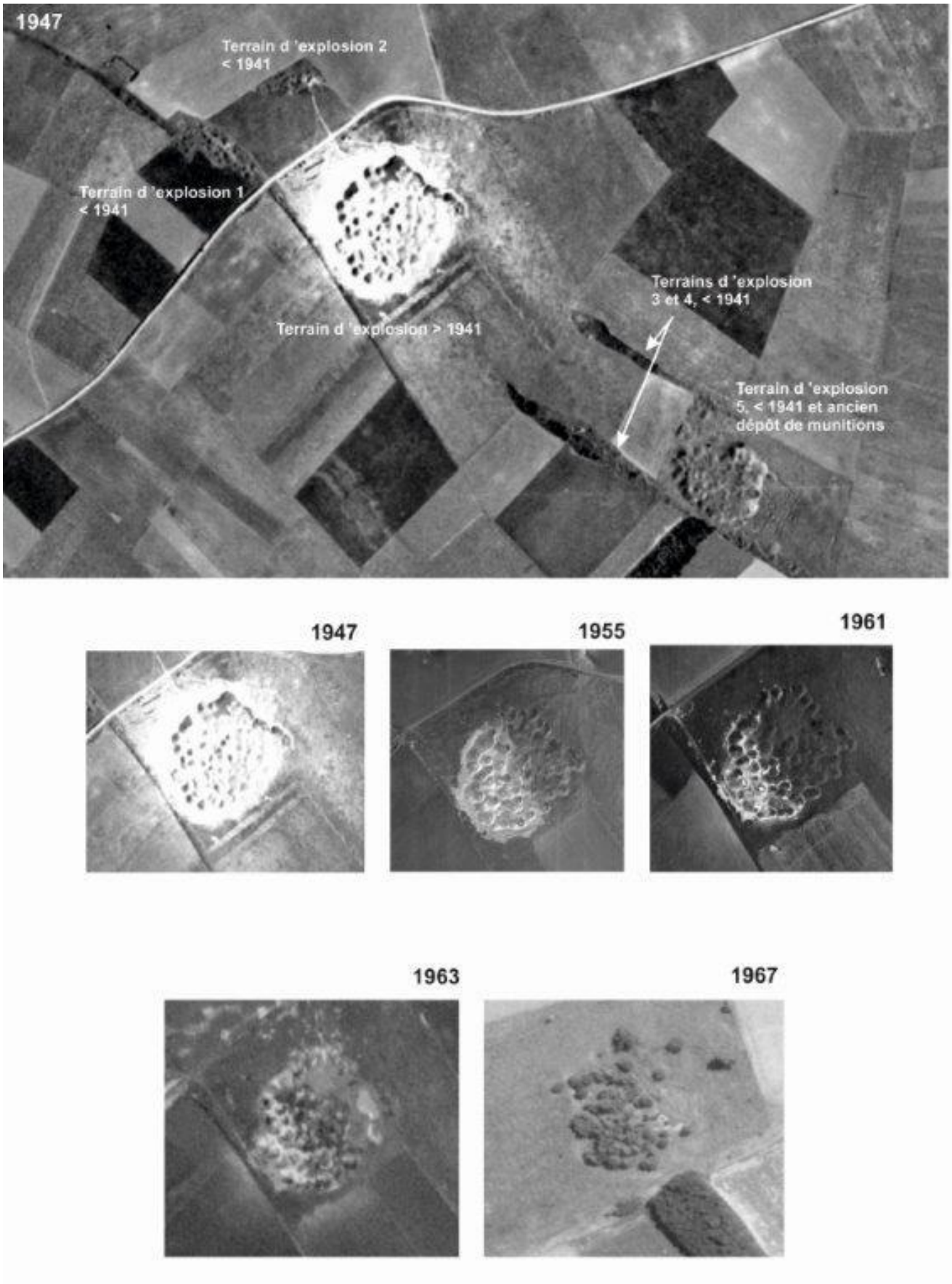


Figure 264 : Vue partielle du terrain d'éclatement de Fampoux (département du Pas-de-Calais) et son effacement du paysage avec le temps.

6. Proposition de quantification des tonnages détruits

Ces quantités restent délicates à estimer avec précision du fait de l'absence de centralisation des dénombrements des quantités démolies, car attribuées à chaque industriel et gérés indépendamment les uns des autres par chacune des Régions militaires. Par ailleurs, on constate une grande hétérogénéité des données, lorsqu'elles existent, car tantôt exprimées en tonnage, tantôt en nombre d'unités, le lien entre les deux n'étant pas direct mais dépendant des calibres et de la typologie des matériels.

Les chiffres avancés dans certains documents d'archives sont aussi confus. Les tonnages et le nombre d'engins sont parfois confondus et intervertis. Ainsi, il est par exemple avancé, pour le département de l'Aisne, qu'entre janvier 1930 et décembre 1935, pour satisfaire 4 320 réclamations, 1 450 000 tonnes de munitions auraient été enlevées dont 167 000 tonnes, jugées intransportables par les artificiers, furent détruites sur place[1734]. Ces quantités ne concernent vraisemblablement des tonnes mais le nombre des engins détruits.

La question se pose aussi de la fiabilité des quantités chiffrées exprimées en tonnes. Les méthodes et moyens d'évaluation des masses d'engins de guerre ne sont pas explicités dans les archives rassemblées et consultées dans le cadre de cette recherche. La méthode par la pesée paraît peu réaliste. Il est vraisemblable que les tonnages aient été estimés par un comptage des projectiles multipliés par les masses unitaires de chaque type / calibre d'engins. Les quantités estimées présentées dans ce qui suit constituent donc raisonnablement des ordres de grandeurs des quantités réelles des Restes Explosifs de Guerre et surplus liquidés dans l'entre-deux-guerres.

L'agrégation des données quantitatives identifiées dans les archives à la faveur de cette recherche (cf. Tableau 33) conduisent à un tonnage de plus de 1 100 000 tonnes, majoritairement dans les Régions militaires principalement concernées par les grandes offensives et les violents duels d'artillerie, à savoir les 1er, 2e et 6e Régions. Elles totalisent à elles trois près de la moitié du tonnage démoli. Le tonnage considérable détruit par F.N. Pickett & Fils s'élèverait à 434 640 tonnes, soit plus du tiers du tonnage total détruit.

D'autres chiffres ont pu être collectés, exprimés soit en tonnage, soit en nombre d'engins (cf. Tableau 34). Les tonnages équivalents ont pu être approchés par la connaissance du poids unitaire de chaque engin (lorsque le type d'engins est spécifié). Ces poids ont été identifiés dans une importante base documentaire provenant de professionnels du déminage[1735]. Ces données complémentaires concernent un tonnage estimé aux alentours de 97 000 tonnes. Ainsi, sachant que les tonnages démolis durant la guerre et sur la période du désobusage militaire entre 1918 et 1920, au droit et aux abords du front occidental, ne sont pas connus, mais vraisemblablement pas négligeables, une quantité totale détruite de plus de 2 000 000 de tonnes semble réaliste.

On rappelle ici qu'un ordre de grandeur de 10 millions de tonnes a pu être avancé dans cette recherche concernant le tonnage de munitions tirées majoritairement sur le front occidental et que les surplus dans l'immédiate sortie de guerre s'élèveraient à 1 700 000 tonnes. Avec un taux de dysfonctionnement des munitions de 25%, le tonnage tiré non explosé se situerait aux alentours de 2 500 000 tonnes. Le tonnage démoli représenterait donc a minima 20% du tonnage tiré sur le front occidental et 47% du tonnage des surplus et Restes Explosifs de Guerre issus de tirs.

[1734] Bibliothèque nationale de France. Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie de l'Aisne. *Mémoires*. 2001.

[1735] Bélot, H. Communication personnelle.

Munitions visées et zones géographiques concernées	Fraction / tonnage total	Tonnage	Source
1er Région militaire (Nord, Pas-de-Calais). à détruire (dont les dépôts de Trélon et Liessies par F.N. Pickett & Fils sous contrat français)	15,89%	**180 000**	Sénat, 1er février 1922
A regrouper sur une usine de destruction (1er Région militaire)	0,57%	6 500	Sénat, 1er février 1922
2e Région militaire (Picardie, Champagne). à détruire	21,19%	**240 000**	Sénat, 1er février 1922
2e Région militaire. Munitions détruites par Savot Frères & Cie entre 1931 et 1937 dans l'Aisne	1,85%	21 000	*National Archives, Washington DC, number RG - 306 - NT.*
2e Région militaire. Munitions détruites par Savot Frères & Cie en 1936 et 1937 dans la Somme	0,31%	3 500	*National Archives, Washington DC, number RG - 306 - NT.*
6e Région militaire (Meuse, nord de la Meurthe-et-Moselle, Champagne). à détruire	13,24%	**150 000**	Sénat, 1er février 1922
A regrouper et à expédier à l'usine de démolition de Kelsterbach (Allemagne)	0,51%	5 755	Sénat, 1er février 1922
7e Région militaire (Vosges, Haute-Marne et Franche-Comté). à détruire	0,14%	1 600	Sénat, 1er février 1922
20e Région militaire (Meurthe-et-Moselle, Aube). à détruire	0,98%	11 100	Sénat, 1er février 1922
21e Région militaire (Vosges, Haute-Saône). à détruire	0,94%	10 600	Sénat, 1er février 1922
Territoire d'Alsace (Bas-Rhin, Haut-Rhin). à détruire	2,03%	23 000	Sénat, 1er février 1922
Territoire d'Alsace (Bas-Rhin, Haut-Rhin). à regrouper sur une usine de démolition	0,28%	3 160	Sénat, 1er février 1922
Territoire de Lorraine (Moselle). à détruire	1,85%	21 000	Sénat, 1er février 1922
Munitions démolies par l'entreprise britannique Cohen à Bourbourg (septembre 1919).	2,65%	30 000	*National Archives, Kew Gardens, London, number MUN5 / 188*
Munitions cédées pour démolitions à l'entreprise britannique Bowen à Conteville (septembre 1919).	1,41%	16 000	*National Archives, Kew Gardens, London, number MUN5 / 188*
Munitions ex-allemandes cédées à F.N. Pickett & Fils pour la destruction au dépôt de Poelkapelle. Contrat belge.	2,86%	32 420	*Zanders. Musée de l'armée, Evere, Belgique.*
Munitions ex-allemandes démolies par F.N. Pickett & Fils, dépôt de Conteville. Avenant (date février 1924) *Conteville Progress.* Rapport d'avancement	1,06%	12 020	*National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 / 7012*
Munitions ex-allemandes cédées à F.N. Pickett & Fils pour la destruction du dépôt de Bourbourg. Contrat britannique n°2, (en date d'octobre 1923). *Bourbourg Progress*. Rapport d'avancement	3,11%	35 200	*National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 / 7012*
Munitions britanniques cédées à F.N. Pickett & Fils pour destruction. Contrat britannique initial n°1.	29,13%	**330 000**	*National Archives, Kew Gardens, London, Mayfair n°321, septembre 1921*
Total détruit et visé par les destructions (tonnes)	**100,00%**	**1 132 855**	**-**
Total Pickett (tonnes)	**38,37%**	**434 640**	**-**

Tableau 33 : Agrégation des données quantitatives relatives aux tonnages de munitions détruites dans l'entre-deux-guerres.

Site de destruction	Unité	Tonnage	Hypothèses	Sources
Elimination par tronçonnage et brûlage des projectiles de tranchées du Polygone de Grenoble aux Burettes, département de l'Isère	30 000	4 230	Un moyenne des tonnages entre une estimation sur les calibre 240 (87 kg) et 340 (195 kg).	Archives départementales de l'Isère
Brûlage de munitions chimiques françaises de 75 mm à l'ERGMu de la Ferté Hauterive par Bouxin (1923), département de l'Allier	160 000	1 120	Projectile de 7 kg	Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057
Brûlage de munitions chimiques françaises de 120 mm FA à l'ERGMu de la Ferté Hauterive par Bouxin (1923), département de l'Allier	30 000	570	Projectile de 19 kg	
Brûlage de munitions chimiques françaises de 145 mm FA à l'ERGMu de la Ferté Hauterive par Bouxin (1923), département de l'Allier	11 000	396	Projectile de 36 kg	
Brûlage de munitions chimiques françaises de 155 FA à l'ERGMu de la Ferté Hauterive par Bouxin (1923), département de l'Allier	142000	6 248	Projectile de 44 kg	
Grillage d'obus à Ypérite de 150 mm et 155 mm de la Grande Guerre entre 1947 et 1955 (volontairement laissé anonyme)	100 000	4 500	-	Archives nationales
Noyage de surplus de perchlorate d'ammonium à l'annexe militaire de l'usine de production SARV à Chedde en 1919	-	4500	-	Service historique de la Défense, site de Châtellerault
Destruction par pétardement de munitions dans le Soissonnais (novembre 1918 - mars 1920)	-	65 229	-	Bibliothèque nationale de France. Rio, A. L'Effort Français, p. 1262.
Destruction de munitions dans les Vosges (1919 - 1920)	-	1 950	-	Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402
Destructions par l'AEF en Meuse (1919)	4 300 000	?	Engins en tout genre	National Archives, Washington D.C. number RG-120
Grenades détruites dans l'Oise, à la date du 10 août 1919,	699 127	699	Pour un poids moyen des projectiles de 1 kg	Archives départementales de l'Oise, site de Compiègne. 1914 - 1918. L'Oise au cœur de la Grande Guerre
Projectiles d'artillerie de campagne détruits dans l'Oise, à la date du 10 août 1919,	270 410	1 893	Pour un poids moyen des projectiles de 7 kg	
Projectiles d'artillerie lourde détruits dans l'Oise, à la date du 10 août 1919,	36 957	1 109	Pour un poids moyen des projectiles de 30 kg	
Détruits, projectiles de tranchées, dans l'Oise, à la date du 10 août 1919,	53 253	799	Pour un poids moyen des projectiles de 15 kg	
Ennoyage dans le Lac Bleu à Avrillé (Maine-et-Loire) Elimination de surplus de grenades de l'usine de Montreuil	30 000	800	Obus VB et grenades	Archives départementales du Maine-et-Loire
Enfouissement d'obus dans le gouffre de Jardel (Doubs)	-	3 000	-	Sécurité civile, service du déminage
Total	**5 862 747**	**97 043**	**-**	**-**

Tableau 34 : Données quantitatives complémentaires relatives aux tonnages et aux nombre d'engins détruits.

7. Résumé et conclusions de la Section 12h

A la date de novembre 2018, le BRGM a identifié 189 sites de destruction de munitions exploités dans l'entre-deux-guerres sur le territoire métropolitain. Les sites historiquement exploités, soit par l'autorité militaire soit par des entreprises privées sous contrat civil ou militaire, et actuellement localisés au sein d'emprises militaires n'ont pas été intégrés à cet inventaire.

L'analyse statistique des données montre par ailleurs qu'environ 80 % des sites identifiés ont pu être correctement géo-localisés. Enfin, les données chiffrées relatives aux tonnages et/ou aux quantités de munitions détruites par site sont rares et souvent parcellaires ; des données ont pu être collectées pour 30 % des sites versés à l'inventaire, ce qui constitue une réelle limite à l'étude, notamment en vue d'une appréciation des éventuels impacts environnementaux liés à ces différents sites.

Les régions Hauts-de-France (44% des sites) et Grand'Est (49% de sites) rassemblent à eux seuls près de 93 % des sites de destruction de munitions identifiés. Il s'agit en particulier (dans l'ordre décroissant) des départements de la Meuse (50 sites), de l'Aisne (31 sites), de la Moselle (19 sites), du Pas-de-Calais (18 sites), de la Somme (16 sites), du Nord (15 sites) et de la Meurthe-et-Moselle (13 sites). Il s'agit des zones des anciennes 1re, 2e et 6e Régions militaires où les combats d'artillerie furent les plus longs et les plus violents notamment durant les phases des grands assauts durant la Première Guerre mondiale. D'énormes moyens d'Artillerie (canons et vastes et nombreux dépôts de munitions avancés, intermédiaires ou de base) y furent concentrés et en partie abandonnés à la cessation des hostilités. Le nombre et la densité des sites est directement en relation avec les tonnages détruits sur ces territoires.

Le travail d'inventaire démontre aussi que tout le territoire métropolitain est concerné. Des chantiers de destruction de munitions ayant parfois démoli d'importants tonnages ont aussi été identifiés en dehors des zones des combats et des armées[1736]. Ces chantiers se sont généralement installés au sein ou à proximité de grands dépôts de munitions, des ERGMu (Etablissements de Réserve Générale de Munitions comme à Mézidon-Canon (à proximité de Caen, département du Calvados)) et/ou d'ateliers de fabrication et de chargement.

Plus du trois quarts des sites identifiés dans le cadre de cet inventaire correspondent à des terrains de pétardement (*Open Detonation*) dont les dimensions sont très variables, allant de quelques gros entonnoirs isolés à des ensembles rapprochés d'enfilades compactes d'entonnoirs de pétardement (terrains d'explosion (TE) ou polygones de destruction). Les entonnoirs de pétardement peuvent être vastes (10 à 20 m de diamètre et profonds de plus de 5 m). Les dimensions des entonnoirs et leur nombre sur un même TE sont proportionnels aux tonnages détruits sur le site. Les TE notoires identifiés sont par exemple ceux de Fampoux (à l'est d'Arras, département du Pas-de-Calais), de Saint-Pol-sur-Mer (à proximité de Dunkerque, département du Nord).

Pour 60 sites, l'exploitation a été conduite par des opérateurs privés (souvent sur mandat militaire) et plus de 20 par l'autorité militaire directement (Armée française mais aussi l'*American Expeditionary Force* (AEF) et le *British Expeditionary Force* (BEF)). Certains sites initialement exploités par les forces armées ont été reprises par des opérateurs privés.

[1736] Sur cent km, en arrière des tranchées, s'étendait ce qui était administrativement dénommé la zone des armées. Le pouvoir y appartenait exclusivement aux militaires, ce qui subsistait du pouvoir civil étant soumis à leur contrôle. Cette bande du territoire national suivait le front.

L'industriel Léon Berge occupa, avec 18 sites, une place de première importance dans l'élimination des engins de guerre de la Première Guerre mondiale (avec le quasi-monopole dans la 1re Région militaire, à savoir le Nord et le Pas-de-Calais); il procéda principalement par pétardement (comme à Fampoux).

Les usines de destruction de munitions par démontage représentent 9 % des sites identifiés. Ces sites sont désignés « multimodaux » lorsqu'ils comportent aussi par ailleurs un ou plusieurs terrains d'éclatement (10 % des sites, 19 sites). Ce sont une trentaine d'installations industrielles de destruction de munitions qui ont été identifiées par le BRGM dans le cadre du présent inventaire. F.N. Pickett & Fils est l'entrepreneur, actif dans l'entre-deux-guerres, qui posséda le plus grand nombre d'usines (12 au total) pour démolir 330 000 tonnes de projectiles britanniques et les tonnages d'engins ex-allemands suivants : 25 000 tonnes de munitions à Trélon / Liessies, département du Nord, plus de 10 000 tonnes à Conteville / Domléger (département de la Somme) et 21 000 tonnes à Poelkapellen, Langemark (Flandre occidentale, Belgique). Pour environ 58 % des sites identifiés, l'opérateur n'est pas connu.

Les chantiers de destruction d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres furent exploités sur des terrains actuellement civils et d'autres sur des terrains restés militaires.

Le présent inventaire est par essence non exhaustif (i) du fait de l'absence d'enregistrements documentaires de certaines activités de destruction de munitions durant la Première Guerre mondiale et dans l'entre-deux-guerres, (ii) des archives souvent parcellaires et incomplètes, (iii) des couvertures très partielles des territoires concernés par les missions de photographies aériennes pour les plus anciennes d'entre-elles.

La liste des sites de destruction d'engins de guerre exploités durant l'entre-deux-guerres est susceptible d'évoluer au regard de l'avancée des recherches historiques et de l'état des connaissances.

L'agrégation des données chiffrées relatives aux tonnages et aux quantités de munitions en tout genre datant de la Première Guerre mondiale démolies principalement dans l'entre-deux-guerres (qu'il s'agisse de surplus ou de Restes Explosifs de Guerre), en lien avec le front occidental, conduit à un estimatif réaliste d'a minima 2 000 000 de tonnes. Avec un taux de dysfonctionnement des munitions de 25% et une quantité tirée estimée à 10 000 000 tonnes, le tonnage tiré non explosé se situerait aux alentours de 2 500 000 tonnes. Le tonnage démoli représenterait donc à minima 20% du tonnage tiré sur le front occidental et 47% du tonnage des surplus et Restes Explosifs de Guerre issus de tirs.

Résumé et conclusions du volet historique

La Grande Guerre de l'Artillerie. L'arme devenue gagneuse de batailles

Débutée follement, à pied et à cheval, la Première Guerre mondiale s'acheva soudainement 52 mois plus tard avec des chars et des avions. La guerre mobilisa la science au front et accéléra, puis paracheva les mutations profondes des moyens de l'Artillerie entamées durant la seconde moitié du XIXe siècle, que ce soit pour les canons dans toute leur diversité, ou encore pour l'arme par essence de l'artilleur, l'obus, et en corollaire l'art et la manière de le vectoriser avec précision sur sa cible, la balistique. Les boulets pleins, les tubes lisses et les propulseurs à base de poudre noire laissèrent place aux projectiles oblongs chargés d'explosifs extrêmement stables et puissants (dont le trinitrotoluène (TNT, *Tolite*) et le trinitrophénol (*Mélinite*)) propulsés par des ergols nitrocellulosiques au travers de tubes à rayures hélicoïdales stabilisant le vol des projectiles. L'artillerie allemande avait fait l'éclatante démonstration de son efficacité et de sa puissance de feu durant les guerres qu'elle mena au XIXe siècle, dont celle, franco-prussienne, victorieuse contre l'Empire de Napoléon III, au terme de laquelle la France fut amputée des provinces d'Alsace et de Lorraine (actuel département de la Moselle). Les deux conférences de La Haye (1899, 1907) sonnèrent comme des signaux d'alarme contre la prolifération de nouvelles armes dont l'usage massif pouvait s'avérer dévastateur. Elles furent des tentatives vaines mais pionnières de réguler par l'humain ce qui était inhumain, la guerre, qui allait bientôt se déclencher.

Lorsqu'éclata en août 1914 la Première Guerre mondiale, l'Artillerie était toujours considérée dans le doctrine militaire française comme une arme de soutien de l'Infanterie, voire un obstacle à la manœuvre, reléguée au second plan par la suprématie de l'offensive à outrance par des charges d'infanterie et de cavalerie à découvert. En août 1914, la bataille des frontières, en Lorraine et en Belgique, vint apporter un sanglant et cinglant démenti à cette croyance. Les Français butèrent sabre au clair contre l'Artillerie la plus puissante au monde et les mitrailleuses. Après l'avancée allemande jusqu'à 40 kilomètres de Paris, la retraite des Français, puis, à la faveur d'une erreur stratégique du commandement d'une armée allemande, après la contre-offensive française de la première bataille de la Marne, Allemands et Français firent l'amer constat que leurs plans offensifs respectifs, misant sur une guerre éclair à l'issue victorieuse en quelques semaines, venaient d'échouer. Aucune des parties n'avait imaginé de plan B et aucun stock ni de munitions, ni de poudres et explosifs, n'avait été constitué dans la perspective d'un conflit qui pouvait durer. En septembre 1914, la situation devint critique, car presque tous les obus avaient été consommés et l'industrie était incapable alors d'en produire dans les délais imposés par les circonstances des opérations militaires ni en quantités et qualités qui satisfassent les besoins des armées en campagne. La crise des munitions mit le gouvernement devant le fait accompli, avec, pour les Français comme les Allemands, le spectre d'avoir à arrêter la guerre faute de munitions. Ce fut l'ordre de mobilisation générale de l'industrie, pour convertir les productions du temps de paix en celles du temps de guerre.

Après les derniers soubresauts de la guerre de mouvement et la course à la mer achevée dans une « mêlée des Flandres » (et la bataille de l'Yser en Belgique), le front se figea au point mort à l'hiver 1914-1915 par le renoncement à l'offensive et la recherche du salut par la défensive, marquant la fin de la guerre de mouvement et le début d'une longue et éprouvante guerre de position (la guerre des tranchées). Une victoire ne pouvait être espérée que si ce mur défensif pouvait être enfoncé. Les grands assauts d'infanterie inspirés du XIXe siècle avaient échoués. La puissance de feu et le pouvoir d'attrition des nouveaux moyens de l'Artillerie s'imposèrent dès 1915 comme les chevilles ouvrières pour appuyer les stratégies d'usure et de rupture et espérer déstabiliser le front puis le percer. La nouvelle physionomie de la guerre contraignit aussi l'Artillerie à s'adapter avec ses matériels et tactiques aux combats rapprochés et à choisir ses cibles.

L'artillerie de tranchée moderne à tir parabolique de courte portée (ancêtre des mortiers) fit son apparition tandis que les carences de l'artillerie lourde sur des zones fortifiées prisées (comme les hauteurs, perchoirs indispensables pour diriger les tirs) furent compensées par les attaques souterraines dans la guerre de mines, au moyen de puissantes charges explosives (fourneaux).

Durant la Première Guerre mondiale, le nombre de pièces, les précisions, les cadences de tir et les portées de l'Artillerie ne cessèrent d'augmenter au même titre que la puissance des projectiles, la diversité des calibres et des chargements (explosifs, à balles, chimiques, incendiaires, fumigènes, etc.).

La première bataille de champagne en février 1915 inaugura les pilonnages massifs, préparatoires aux charges de l'Infanterie. Cette même année, l'artillerie chimique fit son apparition sur les champs de bataille afin d'incapaciter les combattants, les harceler physiquement et mentalement pour les faire sortir de leurs tranchées. En 1916, année des « hyperbatailles » de Verdun et de la Somme, les Britanniques usèrent pour la première fois de pièces d'artillerie mobiles tout terrain, l'arme blindée mécanique, les chars lourds (tanks), peu concluant avant 1917. Cette année-là, la France rattrapa son retard sur l'Allemagne en matière d'artillerie lourde. L'Artillerie tenait le front et rendit vaines les attaques surprises préparées par les charges souterraines, Par l'allongement des portées, l'artillerie lourde fixe ou mobile cibla aussi des positions en profondeur, à l'arrière, pour affaiblir la logistique et aussi, pour la première fois, contre les ébauches du droit international sensé « réglementer » la guerre, pour frapper des villes et terroriser des civils. En 1918, avec la reprise de la guerre de mouvement, les tactiques de l'Artillerie notamment allemande changèrent, en misant sur des séquences de tir brèves mais violentes, combinant des engins explosifs et chimiques, tandis que les chars alliés donnèrent enfin entière satisfaction. Les trois offensives allemandes « de la dernière chance », déclenchées au printemps 1918, avant l'arrivée des Américains, fut stoppée par les franco-britanniques. Lorsque les Alliés entamèrent leur contre-offensive majeure à l'été 1918, ils ignoraient tout de l'état de l'armée allemande et de ses capacités à combattre, et espéraient mettre un point final à la guerre à la fin du premier semestre 1919, à la faveur d'une offensive décisive en Lorraine. Ainsi, lorsqu'à la grande surprise des Alliés, l'armée du *Reich* s'effondra début novembre 1918 et qu'enfin les Allemands demandèrent l'armistice, les approvisionnements en munitions continuèrent.

Nature et évolution des chargements des munitions. Une exploration historique, analytique et isotopique originale

La nature des constituants des munitions et de leurs chargements (explosifs notamment) ne cessa d'évoluer durant la guerre en réponse (i) aux facilités ou difficultés d'accès aux ressources minérales et énergétiques dont les cartes avaient été rabattues par la rupture des liens commerciaux et le blocus maritime britannique sur les mers, (ii) aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées, (iii) aux capacités industrielles et (iiii) aux coûts de production. Globalement toutes les parties usèrent des même explosifs essentiellement nitrés et/ou nitratés mais dans des proportions variables. La majorité des explosifs étaient constitués de NAC (*NitroAromatic Compounds*, nitrés) polaires (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*), apolaires (2,4,6-trinitrotoluène, TNT ou *Tolite*, isomères des dinitrotoluènes, isomères des dinitrobenzènes et isomères des di- et tri-nitronaphtalènes) généralement mélangés au nitrate d'ammonium (explosif nitraté). Certains belligérants engagés militairement sur le front occidental usèrent aussi d'explosifs spécifiques à leur camp. Les Français eurent systématiquement recours à différentes formulations d'explosifs (per)chloratés paraffinés dans l'artillerie de tranchée et les grenades, alors que les Allemands chargèrent certains projectiles de leur artillerie lourde et de campagne avec des DNB (dinitrobenzènes) et des TNN (trinitronaphtalènes) et des engins de tranchée avec des DNT (dinitrotoluènes). Les pénuries en explosifs standards réglementaires en Allemagne conduisirent les industriels à utiliser des explosifs civils des mines et carrières, des explosifs de secours (comme les explosifs perchloratés à la fin de la guerre), voire des déchets de production de TNT (dans les grenades à manche), ce qui a été confirmé par des analyses au laboratoire sur plus de 70 échantillons de poudres et explosifs réalisées dans le cadre de cette recherche.

Ces analyses chimiques et isotopiques (O, Cl de ClO_4^-, O, N de NO_3^-) montrent l'occurrence systématique d'ions perchlorate à des teneurs variables, non corrélées à celles des espèces azotées ($\sum NO_2^-$, NO_3^-, NH_4^+). Les ions perchlorate peuvent avoir deux origines (i) une origine synthétique, ces sels perchloratés étant produit par la décomposition électrochimique de NaCl + O_2 (saumure). (ii) une origine naturelle, les ions perchlorate étant présents en impuretés dans les nitrates du Chili (Atacama) largement importés en Europe dès la moitié du XIXe siècle comme engrais azotés pour la culture intensive de la betterave, mais aussi pour la fabrication d'acide nitrique, un ingrédient indispensable pour la synthèse des explosifs nitrés et nitratés. Le fractionnement isotopique sur $\delta^{18}O$, $\delta^{17}O$ versus ^{37}Cl au sein de ClO_4^- permet de discriminer les ions perchlorate d'origine synthétique $\delta^{18}O$ à $\delta^{17}O = 0$ de ceux d'origine naturelle $\delta^{18}O$ à $\delta^{17}O > 0$ tandis les couples de valeurs $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 des ions nitrate (NO_3^-) renseignent sur l'origine des nitrates et de l'azote, les processus biotiques et abiotiques auxquels ils sont soumis. La question de l'origine des perchlorates et leur lien avec l'azote des nitrates se posa. Un seul échantillon d'explosif de grenade à manche allemande put être analysé aux USA (université du Delaware). Sa signature isotopique est typiquement une signature synthétique ($\delta^{18}O$ à $\delta^{17}O = 0$). Un large spectre de valeurs d'abondances $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 a été mesuré avec des valeurs singulières $\delta^{15}N$-NO_3 extrêmement appauvries, non rencontrées dans la nature, et des valeurs coïncidant aux nitrates des engrais de synthèse. L'hypothèse plausible émise ici est celle de l'adjonction volontaire de perchlorate aux explosifs pour booster la brisance des explosifs médiocres des grenades à manche allemandes. Les signatures isotopiques $\delta^{18}O$-NO_3 / $\delta^{15}N$-NO_3 reflètent vraisemblablement des procédés de fabrication des nitrates (de synthèse ou naturels) présentés et discutés dans le présent manuscrit.

Les chargements chimiques évoluèrent aussi, en se diversifiant, vers des agents toujours plus agressifs et plus sournois comme les *Ypérites* et les arsines. Les Allemands, pour pallier aux pénuries en métaux non ferreux privilégièrent des alliages de mauvaise qualité à base de cuivre, aluminium et de zinc riche en cadmium (toxique) en lieux et place du laiton (Cu_3Zn_2) pour la confection des fusées d'artillerie.

En conclusion, cette recherche montre que la production, le stockage et l'usage d'explosifs explicitement (per)chloratés durant la guerre, pour la confection des fourneaux français de guerre de mines et des chargements des engins de tranchée français et allemands, ne sont pas les seuls pourvoyeurs possibles d'ions perchlorate vers l'environnement. En effet, les perchlorates apparaissent aussi à des teneurs variables dans une grande variété d'ergols solides et d'explosifs nitrés nitratés de la fin de la guerre, notamment ceux chargeant grenades et engins de tranchée. La recherche de la présence de perchlorate dans les explosifs, leurs signatures isotopiques, leurs relations avec celles des nitrates mériteraient d'être approfondies.

Les dépôts de munitions de 1918 et les engins utilisés la fin de la Première Guerre mondiale différaient ainsi significativement en quantité et qualité de ceux de 1914, par la diversification des calibres et l'accroissement des calibres d'artillerie lourde. Les explosifs et la composition des munitions notamment allemandes se diversifièrent aussi significativement pour pallier aux pénuries en matières premières (recours aux *ersatz*, explosifs de secours, explosifs civils détournés à des usages militaires, usage de déchets de production, etc.). Enfin, anecdotiques en 1915, la proportion de munitions chimiques ne fit que croître jusqu'à la fin de la guerre jusqu'à atteindre 30 à 35% des arsenaux.

Transformation environnementale des constituants des chargements

Cette recherche sur la nature des composés d'origine historique susceptibles de marquer notre environnement s'est étendue au comportement environnemental des composés entrant dans la formulation des matières énergétiques. En effet, ces composés se transforment au contact de l'environnement selon de nombreux cheminements réactionnels biotiques et abiotiques débouchant à partir des molécules mères sur un large spectre de molécules filles (métabolites et sous-produits) persistantes et d'une mobilité dépendante de leur structure moléculaire et de la nature du sol et du réservoir aquifère (effet de sorption / désorption).

Les ions perchlorate font exception car, bien plus solubles que les composés nitrés, ils persistent dans les conditions naturellement et habituellement rencontrées dans l'environnement et interagissent très peu avec les matrices solides des sols et aquifères. Ils possèdent les propriétés de traceurs parfaits, migrant de façon conservative à la même vitesse que l'eau. A la liste des composés à rechercher pour qualifier et quantifier l'impact environnemental des pollutions et activités pyrotechniques anciennes en France et en Belgique, basée sur celle des composés entrant explicitement dans les formulations des matières énergétiques documentées dans les archives, il convient donc de la compléter par (i) les sous-produits de transformation environnementale et (ii) les impuretés issues des procédés industriels de fabrication.

Emergence de problématiques inédites avec l'usage sans précédent des moyens de l'artillerie. Restes Explosifs de Guerre (REG)

Avec l'usage massif à une échelle inédite de matériels de guerre de genres nouveaux, des problématiques connues des artilleurs, mais restées avant la Grande Guerre en marge des préoccupations des états-majors et des autorités civiles durant les guerres impliquant l'Artillerie, prirent-elles aussi des dimensions inédites, faisant alors l'objet pour la première fois d'attentions toutes particulières par les autorités militaires comme civiles.

La production de guerre privilégia les quantités à la qualité des munitions. Les cadences de travail sur les chaînes de production, particulièrement soutenues, se soldèrent par des défauts dans la confection des projectiles, des chargements et des fusées. Ces projectiles étaient dysfonctionnels au moment du tir, éclatant prématurément dans l'âme des canons, anéantissant les pièces et leurs servants (accidents de tir), éclatant que partiellement à l'impact en expulsant une partie du chargement (détonation de bas-ordre) ou n'éclatant pas du tout (incidents de tir). Ces « ratés » ou UXO (*UneXploded Ordnance*) restèrent en surface, après avoir ricoché ou non, ou s'enfoncèrent dans les sols à des profondeurs variables dépendantes de la balistique et des propriétés des sols. Les artilleurs notèrent que durant la Grande Guerre qu'environ 25% des tirs étaient défectueux, ce qui, rapportés au milliard de tirs, représentait 250 millions d'engins pour les seules artilleries lourdes et de campagne. La violence des combats lors des épisodes paroxystiques des batailles contribuèrent aussi, dans la confusion du feu, à l'abandon de matériels, à proximité des batteries, dans les abris et tranchées, les caches. D'autres engins furent sciemment enfouis en nombre car endommagés par le bombardement hostile de dépôts de munitions.

Cet ensemble hétérogène est qualifié de Restes Explosifs de Guerre (REG) qui désigne dans le droit international et humanitaire actuel « *les munitions non explosées et les munitions explosives abandonnées* » selon le Protocole de l'Organisation des Nations Unies (ONU) relatif aux Restes Explosifs de Guerre (Protocole V à la Convention CAC de 1980), adopté le 28 novembre 2003.

Les REG des conflits antérieurs étaient constitués de boulets pleins, de projectiles rudimentaires chargés de poudre noire déflagrante peu puissante. Le caractère « explosif » de ces épaves de guerre était une nouveauté en 1914-1918. Les engins tirés et non explosés, par millions, restèrent en puissance d'explosion car armés au moment du tir. Ces REG constituaient aussi (i) une perte sèche de matières et un gâchis de poudres et explosifs inopérants, (ii) une menace pour les troupes au sol mais aussi pour les civils lorsqu'ils purent regagner les zones anciennement bombardées. Cette « pollution pyrotechnique » des sols entravait les usages ordinaires, et en particulier, agricoles.

L'impérieuse nécessité de la récupération et de la destruction des REG au cœur du conflit

Les quartiers généraux de toutes les parties belligérantes s'organisèrent alors pour récupérer au cœur de la guerre matières et matériels abandonnés mais avec des motivations qui différèrent, mais s'entendirent pour combattre un ennemi commun : le gâchis.

Pour les Français, il s'agissait avant tout de protéger la population civile des zones reconquises sur l'ennemi, l'Etat étnt garant de leur sécurité et surtout de libérer les sols des engins dangereux pour permettre au plus vite la remise en état des sols et relancer l'agriculture, indispensable pour alimenter hommes et chevaux au plus près du front. La récupération (*Salvaging*) était de prime importance pour les Corps expéditionnaires britannique (*British Expeditionary Force*, BEF) et américain (*American Expeditionary Force,* AEF) du fait de l'éloignement de leurs bases d'approvisionnement. Enfin les Allemands, se livrèrent en zone occupée au pillage méthodique institutionnalisé, afin de pallier aux insuffisances de leurs ressources en métaux non ferreux et aux difficultés d'approvisionnement du fait du blocus maritime britannique. Les premières instructions encadrant la récupération française datent d'octobre 1914 pour sécuriser les terrains entre les rivières Marne et Aisne libérés à l'issue de la première bataille de la Marne. Une étroite coopération entre autorités civiles et militaires étaient nécessaire pour mener à bien ces missions. Si la nécessité de cette récupération fut indiscutable et consensuelle, la question s'il fallait la conduire en temps de guerre suscita le débat. En effet, récupérer, c'était mobiliser du personnel combattant pour l'affecter à des tâches non combattantes.

Ces récupérations syn-conflit furent réalisées par les unités / escouades de récupération françaises et alliées (*Salvage*). Les soldats furent aidés par des civils et des Prisonniers de Guerre (PG). Des primes incitatrices indexées sur la nature des objets récupérés furent distribuées par stimuler la récupération.

A compter du second semestre 1916, l'accélération des travaux de remise en état des sols agricoles sous l'impulsion du Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des régions envahies se traduisit mécaniquement par le besoin de renforcer les moyens de la récupération. Le 18 août 1917 fut signé un décret visant la création d'un « Service spécial de la récupération », rattaché au Ministère de la Guerre, chargé de la remise en état du sol « des régions reconquises sur l'ennemi ». Le Service spécial se substitua progressivement aux personnels des armées. Revinrent à l'autorité militaire les tâches strictement militaires comme la récupération et la destruction des munitions (désobusage). L'interdépendance des opérations civiles et militaires, l'imbrication des rôles et responsabilités de nombreux acteurs, rendirent pendant la guerre l'exécution et l'organisation du nettoyage des anciens champs de bataille et de la remise en état des sols d'une extrême complexité.

La conférence interministérielle de janvier 1918 déboucha alors sur un texte unique (instructions du 3 mai 1918) qui simplifia le fonctionnement de la récupération. Dans chaque armée, un plan de récupération fut établi. Le rythme de la récupération était dicté par celui des bombardements et des combats. Des instructions furent passées par le GQG aux *Salvages* alliés pour s'assurer de la cohérence de leurs actions avec celles des Français.

Avec la reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918 et le déplacement vers le nord-est des lignes de front, la récupération dut s'adapter à la nouvelle physionomie de la guerre, par notamment une réaffectation des tâches de la récupération des unités combattantes vers, lorsque les opérations militaires l'autorisaient, des personnels militaires non combattants.

La récupération apparaît, dans la dynamique de la guerre de mouvement de 1918 puis dans la perspective d'une cessation prochaine des hostilités comme une variable d'ajustement des approvisionnements de l'Artillerie pour garantir, sur un front mouvant, la constance d'une puissance de feu décisive tout en cherchant à limiter autant que faire se peut l'approvisionnement par du matériel nouveau depuis les arrières.

Les escouades de récupération procédèrent au tri des munitions et, si elles étaient jugées en bon état et transportables, pouvaient être utilisées de suite ou être orientées vers des centres de rassemblement ou de réfection.

Les engins intransportables et/ou en mauvais état étaient détruits sur place par pétardement (*Blown-In-Place* (BIP)), c'est-à-dire par une détonation transmise (« par sympathie ») induite par une charge d'explosif « donneuse » volontairement apposée contre l'engin par les artificiers. Le pétardement pouvait viser des munitions éparses ou regroupées en tas (« fourneaux ») pour être détruites.

La récupération et le désobusage des sols bombardés n'attendit pas la fin des hostilités et, à l'instar de l'Ukraine depuis 2014, s'inscrivit dans la dynamique de la guerre comme une opération à part entière et nécessaire. Le GQG avait parfaitement conscience que la récupération et le désobusage syn-conflit étaient superficiels et partiels. Les forces devaient être prioritairement investies par des tâches combattantes.

Evolution de la nature et de la géographie des REG durant la guerre

Durant la guerre, les REG étaient localisés sur et aux abords des lignes de front et au droit des territoires reconquis sur les Allemands ; leur densité était directement proportionnelle à la durée et à l'intensité des bombardements, variables selon les secteurs. Les sols de ces zones furent « pollués » par des UXO de tout calibre, de toutes les nationalités et confectionnés à différentes périodes de la guerre, auxquels s'associèrent des matériels en tout genre abandonnés, non tirés, épars, en amas, en petits dépôts dans les abris et tranchées ou dans des caches. Les opérations de récupération menées par toutes les parties belligérantes durant les hostilités contribuèrent à modifier cette répartition spatiale, par des transports de munitions et leur convergence vers des centres de rassemblement et/ou de réfection situés à l'arrière dans les zones des armées.

La géographie des REG changea alors significativement avec la retraite allemande et la cessation des hostilités entre juillet et novembre 1918. Les quantités de matériels abandonnés augmentèrent aussi drastiquement.

Dès juillet 1918, les Allemands en retraite abandonnèrent leurs dépôts de munitions de leurs anciennes zones des armées, entre la Marne et la frontière belge, précipitant aussi des projectiles dans les fossés, plans et cours d'eau, à l'est des anciennes lignes de front. Ils délaissèrent aussi en l'état, intacts, sur le territoire anciennement annexé d'Alsace Lorraine, leurs nombreux et vastes dépôts de munitions conformément aux clauses de l'armistice du 11 novembre 1918. A l'ouest des anciennes lignes de front, dans les zones des armées et les *hinterlands* les Alliés entassèrent d'énormes quantités de matériels dans les dépôts intermédiaires, de base, les Etablissements de Réserve Générale de Munitions (ERGMu), les usines de guerre, les ports, ayant maintenu leurs approvisionnements jusqu'à la fin des hostilités. Ces matériels devinrent soudainement à l'armistice en excès par rapport aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées. Ces surplus de guerre alliés et ex-allemands renfermaient des matériels et matières explosives et agressives caractéristiques de la fin de la guerre, dont une forte proportion de munitions chimiques et d'artillerie lourde.

Durant le premier conflit mondial, des quantités considérables de matériels et matières énergétiques et agressives furent produites, stockées puis utilisées sur le front occidental à des échelles et quantités inédites. Les Artilleries délivrèrent plus de deux milliards de projectiles sur leurs adversaires, totalisant environ 10 millions de tonnes, chargés et propulsés par 3 millions de tonnes de produits chimiques (poudres et explosifs). Les explosifs explicitement perchloratés, spécificité française, représentaient moins de 12% des matières énergétiques produites et importées en France durant la Grande Guerre et certainement encore moins si on rapporte les tonnages (inconnus) utilisés par toutes les parties au tonnage total de poudres et explosifs.

« *The Iron Harvest* ». Un nouveau défi inédit à la cessation des hostilités.

La situation de la France et de la Belgique fut en novembre 1918 totalement inédite. Jamais encore auparavant (i) autant d'armes aussi puissantes n'avaient été utilisées à si grande échelle, (ii) la physionomie du sol n'avait été totalement et si profondément bouleversée en si peu de temps. L'ampleur des destructions dépassait, et de loin, ce qui était jusqu'alors connu au terme d'une guerre. Avec la Première Guerre mondiale, les conflits majeurs devinrent indéniablement des acteurs de l'anthropisation des paysages et de l'environnement. L'Artillerie raya des cartes et des paysages des villages entiers comme l'aurait fait plusieurs dizaines de siècles d'abandon et d'érosion et causa 70% des pertes durant la guerre.

Mais un nouveau défi né de la guerre et dans la guerre attendait les déplacés, sinistrés, les militaires qui n'avaient plus à se battre et une nouvelle administration civile à créer pour opérer ce glissement complexe et inusité entre temps de guerre et temps de paix, dans cette antichambre, entre l'armistice du 11 novembre 1918 et l'entrée en vigueur du Traité de paix en janvier 1920, une parenthèse qui n'était plus vraiment la guerre mais pas encore pleinement la paix.

Les données quantitatives collectées dans les archives à la faveur de cette recherche montrent que le tonnage total des surplus de guerre à la cessation des hostilités était considérable et s'élèverait à au moins 1 700 000 tonnes Le corps expéditionnaire britannique (BEF) avait accumulé des tonnages très élevés de munitions, projectiles en tout genre et matériels dans de vastes dépôts des anciennes zones des armées, en particulier dans le Nord et le Pas-de-Calais, estimé aux alentours de 350 000 tonnes. Les surplus américains en France s'élevaient à plus de 250 000 tonnes.

Le tonnage des REG introduits dans les sols par les tirs dysfonctionnels (UXO et munitions déflagrées) reste inconnu. Les sols intensément bombardés furent criblés de cratères d'impacts, lardés de tranchées, mités par des abris et galeries de combat, et constellés de millions de munitions non explosées (en considérant le taux d'incidents de tirs de 25%) que les unités de récupération durant le conflit ne purent évacuer et neutraliser. Particulièrement affectés furent les campagnes et les terres de Champagne, de la Picardie et du Nord Pas-de-Calais, parmi les plus fertiles de France.

La guerre industrielle et de matériel d'un genre nouveau qui brutalement un 11 novembre au matin prit fin, enfanta d'une sortie de guerre complexe, elle aussi industrielle. Relever les ruines, remettre les sols agricole en l'état pour permettre la reprise des labours, relancer les usines occupées, s'était d'abord pour les acteurs de la reconstruction se confronter à la problématique des REG qui se dressait comme un obstacle menaçant sur le cheminement sinueux qui, de la guerre, menait à la reconstruction du quart nord-est de la France et de la Flandre occidentale.

Les sols, les ruines, les crassiers et usines devaient être débarrassés des munitions tirées et celles inutilisées et abandonnées par les Allemands, les voies ferrées encombrées par des wagons chargés de munitions par milliers devaient être libérées pour restaurer la libre circulation des trains pour les besoins des reconstructions. Plus généralement, il fallait impérativement protéger la population de déplacés les sinistrés qui retournèrent chez eux, ou ce qui en restait. Les vastes dépôts de munitions avaient été installés durant la guerre pour les circonstances de la guerre souvent par réquisition d'office d'emprises privées. Libérer ces sols des monceaux de munitions c'était aussi restaurer la libre jouissance de la propriété privée. Cet arsenal du temps de guerre était une source de préoccupations et d'angoisses pour les populations, les engins prolongeant par leur présence matérielle et leur symbolique guerrière et meurtrière, la guerre dans un temps et des espaces à nouveau pacifiés, chez des populations qui n'aspiraient qu'à une nouvelle normalité.

La survenue d'accidents (incendie, explosions, brûlures chimiques et intoxications) parfois spéctaculaires, souvents mortels, relayés par voie de presse, attisa encore la puissance anxiogène des restes de guerre et le sentiment d'impuissance des populations face à ce leg que la guerre passée leur avait imposé. Ces accidents rappelèrent dramatiquement que l'évacuation et la liquidation des REG et surplus de guerre étaient non seulement des impératifs indiscutables, car des prérequis incontournables à toute reconstruction, mais s'affirmèrent aussi avec le temps comme une urgence. Les engins de guerre, provisoirement abandonnés sur le terrain, dans des conditions d'entreposage inadaptées, exposés aux intempéries, aux écarts de température des cycles diurnes / nocturnes, en effet se dépréciècrent rapidement. Le temps joua en leur défaveur par l'accroissement de leur instabilité et par conséquence de leur dangerosité. Les munitions des surplus, en bon état, potentiellement encore utilisables au moment de la cessation des hostilités subirent avec le temps une obsolescence irreversible qui les transformèrent en déchets de guerre (*Ammunition in Excess, Obsolete and Unserviceable* (AEOU)). Il fallait aussi hâter les opérations d'enlèvement des engins de guerre abandonnés, pour accélérer les reconstructions, tant que le personnel possédant les compétences et la force de travail pour cela étaient encore présent, mobilisé sous les drapeaux, qu'il soit français, britannique ou américain, sous commandement unique français depuis mars 1918. Ces opérations pouvaient aussi bénéficier d'une main d'œuvre des prisonniers de guerre, un vivier corvéable à merci mais voué à disparaître avec son renvoi en Allemagne dans le respect du droit international.

La situation militaire semblait fragile pour le GQG, qui voyait une Allemagne encore potentiellement agressive et en force de riposter alors que la paix n'était toujours pas conclue avec une France dont la diplomatie était de plus en plus isolée, en désaccord avec ses anciens alliés sur la question de la résolution de la guerre et du paiement par l'Allemagne des réparations. La récupération du matériels ex-allemand dont le GQG s'était fait une priorité, ne visait-elle pas aussi d'autres desseins, de faire en sorte que l'envahisseur ne puisse plus mettre la main sur son armement?

Une incontournable récupération militaire de première urgence (1918-1919)

La récupération et le désobusage figurent parmi les parents pauvres de l'historiographie officielle de la Grande Guerre, tout juste évoqués en quelques mots, apparaissant çà et là en entrefilets dans les écrits et recherches portant sur cette période grise de l'Histoire de France que fut celle de l'immédiate sortie de guerre, généralement analysée au travers du prisme des reconstructions, des réparations et négocations, des démobilisations, des sphères du deuil. Pourtant ces opérations devinrent à la cessation des hostilités capitales et de prime importance aux yeux du GQG, car constituaient d'abord un prérequis sécuritaire incontournable aux reconstructions.

Une réorganisation de la récupération militaire, qui fonctionna durant la guerre, s'imposa donc dès l'armistice avec l'arrêt des combats et la pleine disponibilité des personnels militaires encore mobilisés ainsi qu'une nouvelle géographie des REG et surplus de guerre. Cette récupération des premiers instants de la sortie de guerre se montra dysfonctionnelle et lente, car confrontée à des difficultés endémiques d'ordre comportementales (indiscipline des soldats démotivés par les missions militaires et en attente de la démobilisation), organisationnelles (imbrication des secteurs de récupération français et alliés, etc.) et structurelles. A cela s'ajoutèrent des causes externes en lien avec l'administration mise en place à la sortie de la guerre. Les opérations de désobusage et de récupération militaires et les travaux de première urgence menés par l'Etat et les administrations temporaires de l'immédiat après-guerre s'imbriquèrent intimement. Les services en charge de la récupération et du désobusage étaient des structures transverses à tous les services, offices, en charge de la reconstruction et aussi mixtes, alliant des intervenants, dirigeants, consultants et exécutants, aussi bien militaires et que civils. Les organigrammes de ces administrations temporaires (parfois éphémères) et transitoires s'avérèrent tentaculaires avec pour conséquences (i) l'atomisation des responsabilités, la dispersion puis la paralysie des pouvoirs décisionnels alors que les arbitrages s'imposèrent plus que jamais face à l'ampleur des tâches de la reconstruction et (ii) l'absence de coordination entre les instances centrales et régionales, les autorités civiles et militaires. Les acteurs de la récupération et plus généralement ceux des reconstructions avaient

aussi à répondre et à satisfaire des demandes provenant de nombreuses instances civiles comme militaires: le Ministère des Régions Libérées pour la remise en état des terres, des maisons, des localités, le Ministère de la Reconstitution Industrielle pour la réouverture des usines et la récupération de matières premières, enfin à l'autorité militaire, le Ministère de la Guerre, qui, par la voie de différents services, demanda à rentrer en possession le plus rapidement possible des munitions éparpillées ou entreposées sur le terrain. La démultiplication des intervenants et des donneurs d'ordre au sein de la récupération, possédant des champs d'intervention et de responsabilité aux contours flous, constitua un indéniable frein à la bonne marche des opérations sur le terrain. Cette récupération, poussive, sous dimensionnée, fut refondue en février 1919 afin de pouvoir hâter la remise en état des sols tant que le personnel encore sous les drapeaux, français comme allié, ainsi que les PG étaient encore disponibles. Le Service de la Récupération et de la Reconstitution fut doté de deux subdivisons, l'une civile, l'autre militaire, appuyées par un nouveau service transverse aux Ministères de la Guerre et celui des Régions Libérées, placée sous les ordres du commandement des régions militaires concernées : le Service du désobusage.

Démarche, méthodes et moyens de la récupération militaire

La récupération d'après-guerre n'eut plus à subir la pression des combats et put s'organiser plus méthodiquement que durant le conflit mais sur un tonnage de REG à traiter bien plus important, et notamment ex-allemand. Les personnels affairés à la récupération procédaient d'abord à l'identification des engins de guerre découvert, en distinguant ceux transportables, de ceux jugés trop dangereux ou « douteux » pour être manipulés et transportés. Des compétences pointues en matière de munitions étaient requises pour cette tâche. Ces derniers étaient détruits sur place, ou non loin de leur découverte, par pétardement si possible dans des dépressions naturelles ou provoquées par les impacts durant la guerre. Les ergols solides et les gargousses de poudres nitrocellulosiques étaient détruits par leur brûlage à l'air libre (*Open Burning* (OB)) dans des sillons (tranchées de brûlage) spécialement creusés. Les engins transportables étaient dirigés vers des centres de triage et de là étaient soit réservés pour leur élimination, soit orientés vers des centres de rassemblement. Des dépôts et des munitions dispersées furent rassemblés dans ces dépôts spécifiques aux engins de son propre camp ou aux munitions ex-allemandes, si possible positionnés loin des lieux habités. Ces dépôts, contrairement à ceux éparpillés, pouvaient être gardés.

Des regroupements massifs de munitions conduisirent dans certains secteurs des anciennes positions arrières (possédant des voies de communication denses et en bon état) à des accumulations de tonnages considérables de restes de guerre, comme dans le secteur de Spincourt en Meuse, à la croisée des 2e et 6e Régions militaires, pour, notamment, les munitions à chargement chimique. Dans ces accumulations, le moindre incident pouvait se transformer en accident catastrophique avec des incendies et explosions semant autour d'eux effroi, stupeur et causant des dégâts aux habitations.Des plans de travail furent élaborés afin de prioriser par ordre d'urgence d'une part les terrains à libérer et d'autre part les matériels à récupérer ou à détruire. Les personnels de la récupération militaire et civile furent incités à la tâche par l'octroi de primes indexées sur la nature des matériels récupérés. Des centres de destruction furent alors exploités par l'Armée pour détruire en masse les munitions obsolètes, en excès et hors d'usage. Les engins étaient pétardés en tas (fourneaux) dans des entonnoirs de destruction, larges et profonds, qui, organisés en chapelets ou en rangées parallèles formèrent des terrains d'explosion (TE). Les artificiers imaginèrent des designs particuliers de fourneaux d'éclatement pour optimiser leur fonctionnement. Bien que renfermant très peu d'explosifs et ne pouvant donc pas détoner convenablement, des munitions à chargement chimiques furent aussi pétardées selon des *modus operandi* bien particuliers.

Les destructions (par pétardement) entraînèrent une perte irrémédiable des matières si coûteuses à produire durant la guerre pour armer la France.

1920. La bascule d'une récupération militaire poussive vers une récupération civile contractuelle et lucrative

Fin 1919, force fut de constater que cette récupération dans son format d'alors était sous dimensionnée en moyens humains et matériels au regard de la tâche à accomplir et des tonnages considérables de Restes Explosifs de Guerre de toute nature abandonnés sur les sols de France et de Belgique, et risquait de l'être encore plus dans un contexte d'accélération de la démobilisation des troupes françaises et alliés et du renvoi des Prisonniers de Guerre. Le débarrassage des anciens champs de bataille et de leurs abords des REG était superficiel et parcellaire malgré les tonnages, inconnus, mais vraisemblablement considérables d'engins de guerre récupérés et/ou détruits. La question du devenir des monceaux de munitions et matériels des surplus de guerre ayant appartenu à toutes les parties belligérantes se posa aussi dans les *hinterlands*, ports, usines de guerre.

Un changement radical survint à la bascule 1919-1920 dans (i) l'organisation et le fonctionnement mais aussi (ii) les finalités de la récupération et du désobusage sous l'impulsion de la démobilisation et du départ de la main d'œuvre jusqu'alors affairée à ces tâches mais aussi du fait de nouveaux progrès dans le domaine de la sidérurgie.

La démobilisation des hommes en armes au sein de l'armée française se termina progressivement jusqu'en 1920 alors que les Américains de l'AEF, avec leurs unités de récupération (*Salvage),* quittèrent le territoire national en à peine six mois après l'armistice. Les Britanniques démobilisèrent aussi très rapidement en 1919 et 1920 tandis que la ratification en octobre 1919 du Traité de Versailles autorisait le retour chez eux, par vagues successives, des Prisonniers de Guerre (PG) allemands. L'Etat français se retrouva donc rapidement non seulement seul face à la problématique du débarrassage des anciens champs de bataille de leurs engins pyrotechniques, mais aussi dépourvu de la main d'œuvre militaire jusqu'alors en charge de cette tâche. Cette situation avait été anticipée dès 1919 par le Ministère de la Guerre et le Ministère des Régions Libérées, année durant laquelle furent signés par l'Etat, avec l'entreprise civile et privée Clere & Schwander, des contrats pour des opérations particulières irréalisables par l'Armée : la liquidation des vastes dépôts de munitions essentiellement ex-allemandes de Spincourt (Meuse) et de la Hardt (Haut-Rhin).

La mise au point des fours à réverbères Martin-Siemens, devenus pleinement opérationnels, permettait de fondre et recycler des vieilles ferrailles pour en faire des aciers performants. Les anciens champs de bataille et plus encore les surplus de guerre (ne nécessitant aucune récupération et aucun rassemblement majeur) se commuèrent alors en véritables « gisements » de matières premières secondaires valorisables, dont les reconstructions avaient grandement besoin, et qu'il fallait récupérer. Les Restes Explosifs de Guerre changèrent de statut, passant de déchets de guerre (au sens de la Loi du 15 juillet 1975), à celui de matières recyclables et profitables avec en premier chef les métaux (acier, fonte, cuivre, zinc, plomb, etc.). Pour passer des munitions anciennes à des matières inertes prête à être refondues, il fallait neutraliser les engins et les décharger de leurs matières dangereuses.

La solution pour poursuivre la récupération et le désobusage malgré l'absence de main d'œuvre militaire fut trouvée : l'Etat délégua cette tâche par adjudications à des entreprises privées. Les archives consultées dans le cadre de cette recherche n'abordent pas la question des critères selon lesquels ces entreprises furent jugées compétentes par l'Etat et retenue par adjudication, sachant qu'il n'y avait probablement pas de précédent pour ce type d'opérations avant 1919. Possiblement, pour parer à l'urgence, les entreprises les plus offrantes et affichant les meilleures garanties de réussite furent retenues pour ces opération exceptionnelles, motivant la contractualisation selon une procédure de gré à gré.

Avant 1920, les travaux de récupération et de désobusage furent opérés directement par des moyens et des personnels issus essentiellement des Services de l'Artillerie, par délégation du Ministère des Finances, Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks (le financeur). Ces opérations d'intérêt général, désintéressées sur le plan financier, visaient la protection de la population dont l'Etat était garant, la récupération des matériels et matières abandonnées propriétés d'Etat et rendre faisable les reconstructions (industrielles, agricoles, etc.). La finalité de la récupération et du désobusage resta inchangée pour l'Etat, mais fut aussi motivée dès 1920 par des intérêts privés et la recherche du profit. Neutraliser les Restes Explosifs de Guerre ne visaient plus uniquement à annihiler leurs fonctionnalités militaires et leurs dangers, mais aussi à récupérer toutes les matières valorisables constitutives des engins à des fins rémunératrices.

La coexistence préjudiciable de deux types de contrats de récupération

Sur les anciens champs de bataille à libérer des REG, deux types de matériels rémunérateurs se côtoyèrent, (i) ceux encore actifs, en puissance d'explosion, les projectiles non explosés et (ii) des ferrailles inertes, éclats, chevaux de frise, hérissons et barbelés. Deux types marchés furent conclus sur cette base dans chacune des 1er, 2e, 6e Régions militaires, (i) les marchés dits « des Régions Libérées » qui visaient la récupération des vieilles ferrailles inertes, c'est-à-dire ne renfermant aucune matière explosible et (ii) les marchés dits « du Temps de Guerre » qui visaient explicitement les Restes Explosifs de Guerre.

Les marchés furent attribués par département, pour certains d'entre eux (comme l'Aisne), subdivisés en sous-secteurs (lots) selon l'importance des travaux à réaliser (du tonnage à récupérer). Le choix des entreprises et le contrôle de l'exécution des marchés furent confiés à la Direction de l'Artillerie (DA) et plus précisément aux commandements des Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) des Régions militaires concernées. Dans les 7e et 20e Région militaires (comprenant les anciens champs de bataille en montagne des Hautes-Vosges), les combats intenses d'Artillerie n'intéressèrent que des zones d'étendue relativement restreinte, et la DA ne jugea pas nécessaire d'y recourir systématiquement à des contrats, le désobusage fut pris en charge directement par les PAR après signalement des engins par l'autorité civile.

Les premières adjudications furent conclues sans mise en concurrence (en gré à gré) au motif des exceptions prévues par l'Article 18 du Décret du 18 novembre 1882 sur les marchés publiques (travaux que des nécessités de sécurité publique empêchent de faire exécuter par voie d'adjudication et travaux qui, dans les cas d'urgence évidente amenées par des circonstances imprévues, ne peuvent pas subir les délais des adjudications). Les archives consultées dans le cadre de cette recherche n'abordent pas la question des critères selon lesquels ces entreprises furent jugées compétentes par l'Etat et retenues par adjudication, sachant qu'il n'y avait probablement pas de précédent pour ce type d'opérations avant 1919. Possiblement, pour parer à l'urgence, les entreprises les plus offrantes et affichant les meilleures garanties de réussite furent retenues pour ces opération exceptionnelles, motivant la contractualisation selon une procédure de gré à gré. Le premier marché militaire « du Temps de Guerre » fut passé le 19 mai 1920 par le commandant l'Artillerie de la 1re Région, opérant pour le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) avec la société F.N. Pickett & Fils pour la démolition de 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes entreposées dans la forêt de Trélon (département du Nord).

La revente des ferrailles formant les engins de guerre aux sidérurgistes pouvait s'avérer lucrative pour les entreprises de récupération, mais s'agissant de matières propriétés d'Etat, les produits de la récupération étaient cédés aux entrepreneurs contre le versement au Trésor d'une redevance à la tonne, indexée sur la nature des métaux, et suivant des barèmes propres à chaque type de marché. Les redevances applicables aux marchés « du Temps de Guerre » étaient moins élevées que celles « des Régions Libérées », car honorer ces derniers marchés étaient moins exigeants que les premiers, demandant de réelles compétences d'artificiers et une indéniable prise de risque. Les clauses contractuelles déportaient aussi clairement la responsabilité d'éventuels accidents / incidents provoqués par les munitions de l'Etat sur les entreprises privées.

La coexistence de deux contrats dont l'exécution était assujettie à deux tarifications de redevance différentes, mais visant une seule et même marchandise, les vieux métaux, devint rapidement problématique. Les matériels visés par les marchés militaires étaient bien plus rémunérateurs et attractifs que les ferrailles inertes des marchés « des Régions Libérées », mais aussi bien plus dangereux à acquérir. La provenance des ferrailles au moment de la pesée était impossible à tracer. S'ensuivirent (i) des récupérations illicites (ii) de nombreuses fraudes par l'imputation d'un marché sur l'autre, (iii) de nombreux accidents, généralement mortels, de récupérateurs imprudents, inconscients, non formés au désobusage et (iiii) des récupérations sélectives ne visant que les engins les plus rémunérateurs sans prises de risque, le reste étant caché, enfouis.

Ces agissements se firent en toute impunité, car aucun organe de contrôle, de police, aucune sanction pour le non-respect des règles, n'étaient prévus aux contrats. Les clauses des cahiers des charges et les marchés souffrirent en effet de faiblesses et d'imprécisions se traduisant par des difficultés de contrôle et de gouvernance par les instances militaires en charge de la bonne exécution des contrats. De nombreux avenants furent également produits en chaine, afin d'ajuster les prix aux fluctuations des cours des métaux, et vinrent encore complexifier la gestion des contrats. La gestion du désobusage par voies contractuelles comportait un ensemble de procédures auxquelles les Services de l'Artillerie n'étaient pas nécessairement préparés. L'Armée était vraisemblablement mieux outillée et organisée pour mobiliser et faire la guerre qu'orchestrer dans le cadre général de la démobilisation, le désarmement contractuel des sols. Des anomalies dans la gestion des contrats par la DA furent constatées.

Cette récupération privée sous contrôle militaire fut également confrontée à une autre difficulté : le retour de la légitimité de l'autorité civile face à l'autorité militaire omnipotente durant la guerre. Maires, Préfets et propriétaires fonciers pouvaient s'opposer aux projets d'installation de terrains d'explosion, à la présence des récupérateurs sur des terrains, etc.

La majorité des contrats arrivèrent tant bien que mal à échéance en 1928 et 1929, date à laquelle les entreprises Berge, Savot Frères & Cie et Meignie & Meyer se partagèrent à elles trois tous les contrats les plus lucratifs, à savoir deux du « Temps de Guerre ». L'organisation contractuelle fut alors repensée en 1929, avec notamment (i) le passage à un marché unique, (ii) la mise en place de procédures de mise en concurrence d'entreprises présélectionnées par la DA pour leurs compétences et les garanties financières et (iii) l'instauration d'un organe de police (la Gendarmerie).

Une récupération déclinante des années 30

Mais la période du passage au régime des marchés uniques coïncida aussi autour de 1930 avec celle de l'amorce d'une conjoncture extrêmement défavorable pour les récupérateurs et désobuseurs, avec d'abord la crise économique mondiale, qui vit s'effondrer les cours des métaux, puis l'amenuisement du stock de matériel potentiellement récupérable au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Seules survécurent à cela dans les années trente les entreprises possédant les reins financiers les plus solides et les périmètres de récupération les plus étendus, c'est-à-dire les anciens titulaires des marchés militaires, Berge, Savot Frères & Cie et Meyer (Meyer & Delaire). Les activités de Berge s'étendirent au – delà des limites historiques d'implantation de l'entreprise, la 1er Région militaire, puisqu'il exploita aussi au moins deux sites en Meuse, vraisemblablement à Brandeville et au Ravin du Helly à Douaumont tandis que Savot Frères & Cie était encore actif à Coucy-le-Château (département de l'Aisne) en 1937.

Cette entreprise élargit son périmètre de récupération aux autres ferrailles qui étaient sans lien avec les munitions pour pouvoir pérenniser son activité, mais dut probablement mettre un point final à son activité en 1938 suite à la révélation d'activités illicites (la livraison d'armes de 1914-1918) en lien avec le mouvement complotiste et terroriste (CSAR, Comité Secret d'Action Révolutionnaire encore surnommé « La conspiration de la Cagoule »).

La liquidation des surplus de guerre. Une histoire européenne

Parallèlement au nettoyage des anciens champs de bataille restait en suspens la question des surplus de guerre dont la problématique, débordant le cadre géographique des lignes de front, concernait tout le territoire métropolitain dans ses frontières de 1914, mais aussi au-delà, les territoires anciennement annexés d'Alsace-Lorraine, en Allemagne, occupée et comme libre, et la Grande-Bretagne.

L'Armée française entra en Alsace et en Moselle à la mi-novembre 1918 puis les armées françaises, belges, britanniques et américaines pénétrèrent en Allemagne fin novembre 1918, occupant chacune sur leurs secteurs respectifs, la Rhénanie en rive gauche du Rhin, pour créer un espace tampon démilitarisé entre l'Allemagne non occupée qui devait payer les réparations de guerre et la France dont la sécurité devait être garantie. Il s'agissait aussi d'exercer une pression politique et militaire sur le gouvernement allemand dans le contexte des négociations des conférences préparatoires au Traité de paix qui fut signé à Versailles le 28 juin 1919 et qui entra en vigueur le 10 janvier 1920. Les clauses militaires de l'armistice (reconduit trois fois par des conventions additionnelles) imposèrent que soient livrés aux Alliés en zones occupées, les munitions et approvisionnements militaires exempts de destruction et que la rive gauche du Rhin soit démilitarisée. En Alsace-Lorraine, en Rhénanie comme ailleurs en France, les Alliés mirent la main sur des matériels et dépôts de munitions ex-allemands délaissés tels quels, intacts. Les matériels et munitions de guerres ex-allemandes, anciennement propriété de l'Etat allemand devinrent des prises et butins de guerre, un acompte aux réparations de guerre. Les Américains prirent possession des matériels ex-allemands en Rhénanie occupée, puis les vendirent à des entreprises privées allemandes pour faire en sorte, que conformément aux accords, elles puissent être neutralisées.

Les opérations visant en Allemagne la gestion des restes et surplus de guerre débutèrent dès 1919, par le rassemblement des munitions par des entreprises privées sur des dépôts et sites industriels bien identifiés, et par d'importants mouvements de tonnages de munitions de part et d'autre de la frontière, pour approvisionner notamment les armées alliées engagées militairement plus à l'est contre les bolcheviques ou encore soutenir militairement des forces hostiles aux bolchevicks, en Pologne et en Tchécoslovaquie. L'AEF transféra en Allemagne, depuis ses grands dépôts du *Salvage* en Meuse, des munitions pour être démolies à proximité de Coblence et rapatria aussi aux USA des engins ex-allemands pour des expérimentations. Des munitions françaises furent aussi expédiées en Allemagne pour doter l'Armée du Rhin, d'autres furent cédées à la Tchécoslovaquie et à la Pologne.

Les rassemblements entamés dès 1918, se poursuivirent aussi en France en 1919, opérés par l'armée. Les munitions chimiques françaises excédentaires (environ 4 millions d'engins en reliquats) furent dirigées sur l'ERGMu de la Ferté-Hauterive dans le département de l'Allier, alors qu'en Allemagne non occupée, ces projectiles toxiques convergèrent sur le dépôt et le site de chargement de munitions chimiques de Breloh (Münster, Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie), fief de la guerre chimique allemande (centre d'expérimentation de Fritz Haber). Des mouvements de masses considérables de munitions furent aussi opérés en France pour éloigner des stocks dangereux des zones habitées comme dans le grenoblois, suite à une explosion accidentelle catastrophique en 1918.

Au même moment, l'Armée française engagée en Italie ne fut pas en capacité de rapatrier en France les munitions, pétards, signaux et artifices en tout genre, instables, qui furent *in fine* dirigés vers des centres de rassemblement avant d'être détruits par pétardement, en Lombardie en 1919. A l'instar du Corps expéditionnaire français en Italie, les Britanniques en France ne jugèrent pas nécessaire de rapatrier outre-manche les 350 000 tonnes d'engins en surplus ; le *Disposal Board* entreprit de les démolir sur place en confiant ces stocks à des entreprises privées britanniques (Cohen, Armes George & Cie).

Liquidation des surplus ex-allemands et des REG des champs de bataille des anciens territoires annexés du *Reichsland Elsass Lothringen* (devenu le Territoire d'Alsace-Lorraine en 1918)

Les munitions ex-allemandes du Territoire d'Alsace-Lorraine (environ 35 000 tonnes en dépôt en 1919, 44 000 tonnes à détruire et 22 000 tonnes à regrouper en 1922) furent démolies selon le même schéma que dans les autres Régions militaires, mais ces démolitions furent effectuées par les artilleurs du Parc d'Artillerie de la Place de Strasbourg (PAPS) sans passage par des contrats avec des opérateurs privés, à l'exception pour la liquidation des vastes dépôts de munitions et centres de rassemblement du Bois de l'Hôpital (Moselle), du Bois de Lorraine (Bas-Rhin), du *Munitionsanstallt n°3* (MA3) (Bas-Rhin) et du *Hartwaldlager* (Haut-Rhin) confiée par la Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à respectivement la Société Lorraine des Produits Industriel (SLPI) en Moselle, à Bouxin dans le Bas-Rhin et Clere & Schwander dans le Haut-Rhin. En Moselle, un contexte socio-politique singilier local vint faire obstacle aux projets d'Etat d'élimination des REG du territoire de Lorraine. Le dépôt du Bois de Lorraine aurait dû être déplacé sur celui du Bois de l'Hôpital pour être liquidé. Le contrat Clere & Schwander du *Hartwaldlager* signé en juillet 1919 était le premier contrat connu passé par l'Etat vers une entreprise privée pour la liquidation de surplus de guerre.

Les industriels mandatés par l'Etat pour libérer les sols d'Alsace-Lorraine des surplus ex-allemands eurent à subir le contexte socio-politique si singulier et d'une extrême complexité du TAL lors de son retour sous le giron français et dans un climat (i) de morosité de la population, déçue par le retour de l'administration française, et en proie au « Malaise alsacien-lorrain » et (ii) de défiance des autorités civiles locales à l'égard de l'autorité militaire et de l'administration transitoire imposée en Alsace-Lorraine par et depuis Paris (Commissariat Général de la République). Le flou réglementaire dans lequel devaient être menée dans un temps très restreint la liquidation contractuelle des restes et surplus de guerre atteignit dans le TAL un sommet avec l'interpénétration du droit général français et des droits locaux hérités de régime administratif allemand.

Le PAPS procéda prioritairement à la destruction de nombreux dépôts en Moselle et dans la plaine d'Alsace, le désobusage des anciens champs de bataille, situés dans les hauteurs du massif des Vosges, jugés difficiles d'accès et non peuplés, ne présentant aucun caractère urgent. Seul furent ouverts et sécurisés avec l'aide du Club Vosgien des chemins menant aux sites de mémoire du Lingekopf et de l'Hartmannswillerkopf. D'autres dépôts furent rassemblés au MA3 d'Illkirch Graffenstaden. Doté de peu de moyens les artificiers ne désobusèrent que sommairement ces hauteurs, étant pris de vitesse par la reconquête des terrains dévastés par la végétation. En Moselle, la liquidation des dépôts du Bois de l'Hôpital et celui du Bois de Lorraine tardèrent. Malgré les mises en garde des autorités locales et nationales, notamment par le général Berthelot, face au danger que représentaient ces dépôts, des incendies et explosions accidentelles s'y produisirent provoquant des mouvements de panique au sein des populations angoissées et les protestations des autorités civiles locales contre l'inaction de l'administration transitoire imposée en Alsace Lorraine par Paris. En avril 1920, une explosion dramatique tua 15 ouvriers dans un des chantiers de destruction de munitions du *Hartwaldlager.* Après un jugement devant le tribunal pénal, l'exploitant Clere & Schwander fut sanctionné. L'affaire suspendit probablement l'exécution de tous les marchés de démolition en vigueur au niveau national et souleva les ires de l'opposition politique de gauche fustigeant le Commissariat, qui en faisant appel à un industriel se serait déchargé de ses responsabilités, sacrifiant ces ouvriers sur le billot du profit.

Bouxin se vit refusé par la municipalité d'Illkirch l'installation d'un terrain de brûlage suite à un litige opposant le Maire avec le PAPS et le Ministère de la Guerre au sujet des indemnisations pour l'occupation d'office du terrain communal du MA3 durant la guerre que Bouxin occupait.

Pour sortir de l'impasse, en Moselle, le Ministère de la Guerre trancha. Plusieurs dizaines de milliers de tonnes de munitions chimiques et conventionnelles furent transférées à l'été 1921 du territoire de Lorraine (dépôts du Bois de l'Hôpital et du Bois de Lorraine) en Allemagne (secteur sous contrôle militaire français) pour être démolies dans l'usine de destruction de Kelsterbach, à proximité de Francfort-sur-le-Main (Land de Hesse), exploitée par un consortium franco-allemand (impliquant la SPLI sous contrat avec le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), suite au refus des autorités messines (Hospices de Metz) d'autoriser l'exploitation de l'usine SPLI, pourtant en cours de construction, initialement projetée au Bois de l'Hôpital, au sud-est de Metz.

Enfin, autre singularité du TAL, des munitions ex-allemandes de 1914-1918, jugées en bon état, furent écartées des processus de destruction et réservées dans des dépôts pour éventuellement venir alimenter les canons d'artillerie de place des *Festen* ex-allemandes des ceintures fortifiées de Metz, Strasbourg, dotées de pièces allemandes, qui intégrèrent dans les années trente le chapelet de fortifications de la Ligne Maginot. Vers 1933, ces munitions furent, pour certaines d'entre elles, remise en état (*retro-fitting*) pour défendre les frontières de l'est à nouveau potentiellement menacées. Celles irrémédiablement détériorées furent détruites.

La liquidation des surplus ex-allemands en Allemagne sous contrôle militaire allié. Convergences et divergences avec les pratiques alliées

Les clauses du Traité de Versailles étaient plus contraignantes encore pour l'Allemagne que celles de l'armistice puisque les restes de guerre, munitions chimiques, toxiques de guerre rassemblés en 1919 dans des dépôts et usines devaient être livrés et détruits dans des délais de deux à trois mois après l'entrée en vigueur dudit traité (janvier 1920). Il était question de plusieurs millions de projectiles, plusieurs dizaines de milliers de tonnes. Les usines de toxiques de guerre devaient aussi être mise hors capacité de produire. De tels délais étaient clairement irréalistes, participant au *Diktat* des Français sur l'Allemagne pour la faire payer. L'IMKK (*Interallierte Militarische Kontrol Kommision*) (Commission Militaire Interalliée de Contrôle, CMIC) et ses trois sous-commissions, furent mises en place en octobre 1919 pour s'assurer, par des contrôles militaires, du bon respect des obligations du désarmement selon les exigences du Traité de Versailles.

En France, Angleterre, comme en Allemagne, les Ministères (Ministère de la Guerre, Ministère des Finances, *Ministry of Munition, Reichschatzministerium*), mandatèrent des entreprises privées, d'abord par contrat en gré à gré, puis après mise en concurrence, via des services et offices spécialement créés (Sous-Secrétariat à la Liquidation des Stocks, *Disposal Board, Reichsverwertungministerium*). Les munitions étaient cédées aux entreprises afin qu'elles les neutralisèrent et écoulèrent sur les marchés les matières valorisables provenant du démontage des projectiles (acier, laiton, cuivre, zinc, nitrate, etc.) en contrepartie du versement au Trésor de redevances, source de recettes pour l'Etat. Les méthodes et moyens mis en œuvre pour la destruction de ces matériels de guerre étaient similaires ou proches de celles employées au rebutage des REG en France et en Belgique.

Au-delà de ces similitudes, la liquidation des surplus de guerre en Allemagne se distingua de ce qui était pratiqué en France au même moment, premièrement dans la finalité des démolitions, avant tout motivées par des exigences géopolitiques de désarmer l'Allemagne et non pour reconstruire. Dans l'Allemagne non occupée, les finalités des démolitions des surplus de guerre devaient aussi certainement avoir pour le gouvernement de la République de Weimar une finalité pécuniaire. Ensuite, les entreprises exécutantes, isolées en France et en Grande-Bretagne, se regroupèrent en syndicat en Allemagne (une soixantaine d'entités).

Enfin, les rebutages des munitions allemandes furent placés sous un contrôle technique direct des armées alliées dans les secteurs sous occupation (française, américaine et britannique selon les secteurs), et via l'IMKK en territoire libre non occupé. A aucun moment du processus de gestion et de destruction des munitions anciennes, l'Armée allemande n'intervint (pour ne pas avoir accès à l'armement), alors qu'en France, son intervention était omniprésente (organe de contrôle). L'organisation du contrôle et de la « maîtrise d'œuvre » retenue par les Américains dans l'Eifel (dépôts de rassemblement et usine de Hallschlag) et aux alentours de Coblence s'inspira de celle appliquée par les Britanniques dans la région de Cologne.

Les liquidations des surplus de guerre ne débutèrent en France comme en Allemagne qu'à compter du dernier trimestre 1919. L'explosion catastrophique du dépôt de Breloh du 24 octobre 1919, la plus grosse explosion accidentelle impliquant des munitions chimiques, réaffirma l'impérieuse nécessité de liquider ces stocks. Les démolitions s'accélérèrent alors début 1920 en Allemagne libre comme occupée. 1920 marqua l'apogée de l'activité de démantèlement des munitions anciennes. Cette accentuation des démolitions de munitions fut possiblement une conséquence de l'entrée en vigueur du Traité de Versailles le 10 janvier 1920, et le non-respect, acté dès le 31 mars 1920, des clauses de ce dernier sur la démilitarisation de l'Allemagne se traduisant par un possible renforcement du contrôle des opérations par l'IMKK. Les Alliés hâtèrent aussi possiblement les démolitions en prévision d'une démobilisation possiblement rapide des corps expéditionnaires américains et britanniques en Allemagne dans un contexte de très grande agitation politique et sociale du pays. Par ailleurs, le Président démocrate Wilson fut écarté de l'exécutif au profit des Républicains prônant le retour à l'isolationnisme et fut désavoué par le Sénat qui refusa de ratifier le Traité de Versailles. Les Etats-Unis se trouvèrent dans le paradoxe d'avoir à s'assurer du respect par l'Allemagne des exigences d'un traité qu'ils n'avaient pas ratifié. Le 29 mai 1920, l'usine de Hallschlag sous contrôle américain explosa occasionnant des dégâts considérables aux villages alentours.

Cet accident et ces contextes socio-politiques allemand et états-unien coïncidèrent avec un coup d'arrêt des opérations de démolition de munitions par des entités privées sous contrat et sous contrôle militaire américain. Il s'agissait d'achever au plus vite les démolitions. Les Américains sommèrent alors les entreprises de hâter (par la menace) les démolitions pour clore leurs contrats. Les entreprises allemandes se trouvèrent dépossédées des opérations et recettes des démolitions des engins de guerre. Les opérations à Hallschlag s'achevèrent en décembre 1921. Le dernier inspecteur américain se retira le 15 décembre 1921.

Le dépôt de munitions chimiques de Breloh fut liquidé entre 1921 et 1925 par une entreprise privée (*Kampfmittelverwertung* Dr. Hugo Stolzenberg) sous contrôle de l'IMKK en combinant du pétardement en fosse et le brûlage des fragments résiduels par temps frais.

Mais l''Allemagne se préserva de la destruction de l'intégralité de ses toxiques de guerre et du démantèlement de l'outil industriel nécessaire à leur production, contrairement aux exigences des Articles 168 et 171 du Traité de Versailles.

La liquidation des excédents de guerre en France

La liquidation des munitions chimiques anciennes, hors service et excédentaires rassemblées et stockées à l'ERGMu de la Ferté-Hauterive ne fut pas hâtée comme à Breloh, la France ne devant répondre à aucune injonction à éliminer au plus vite ces matériels. Elle fut opérée en a minima deux phases au regard des archives consultées (i) par l'industriel Bouxin par un contrat de septembre 1923 avec le Parc d'Artillerie pour le brûlage d'environ 350 000 engins de différents calibres possiblement endommagé consécutivement au sinistre survenu en mai 1922 ayant détruits 280 000 obus chimiques de gros calibres (ii) en 1927 par un Bataillon d'Ouvriers de l'Artillerie (BOA) dans des conditions de travail et de sécurité effroyables, pour neutraliser les engins mais aussi les décharger en vue de les recharger avec des toxiques « frais » (opérations de *retro-fitting*).

Bouxin, ou un autre industriel du même nom tenta dès 1921, sous contrat, de liquider le stock de bombes de tranchées déplacé depuis le grenoblois à 40 km de là, au camp des Burettes ; il stoppa ses activités suite à des accidents mortels survenus fin 1923. Les bombes restèrent ainsi stockées à l'air libre avant que le Ministère de la Guerre prit la décision d'enfouir sur place ces 30 000 projectiles en 1928. Il est vraisemblable qu'à instar des ERGMu de la Ferté-Hauterive (Allier) et celui de Mézidon-Canon (Calvados), des démolitions aient été opérées dans d'autres dépôts de munitions de l'armée dans l'entre-deux-guerres.

Des excédents de production industrielle furent aussi définitivement abandonnés au terme des hostilités. Dans les Alpes, le site industriel de production de sels de (per)chlorate et de fabrication d'explosifs (per)chloratés de Chedde (département de la Haute-Savoie) se débarrassa par noyage en août 1919 d'un reliquat de plus de 4 500 tonnes de perchlorate d'ammonium dans la rivière Arve. L'abandon définitif fut aussi l'option retenue pour environ 4 millions de grenades chloratées, excédents de production, ennoyées dans une ancienne ardoisière à Avrillé (département du Maine-et-Loire) proche voisine de l'usine de munitions. La *Disposal & Liquidation Commission* procéda aussi à en Grande-Bretagne à l'élimination par brûlage d'excédents de production, de poudres (*Cordite*), d'explosifs (TNT, *Lyddite* (trinitrophénol)) et de toxiques de guerre (*Ypérite*) dans six usines implantées à proximité de grands dépôts.

Francis Norman Pickett, et l'ascension d'un géant du désobusage en France et en Belgique

Les années 20 virent aussi l'arrivée sur le théâtre des opérations de la liquidation des surplus de guerre en France et en Belgique d'un acteur majeur : le britannique Francis Norman Pickett.

Francis Norman Pickett était un ingénieur brillant, inventif. Ambitieux, il était aussi doté, comme son père d'un talent d'homme d'affaire. Il créa dans l'immédiate sortie de la Première Guerre mondiale sa propre entreprise, de droit français, sous la raison sociale « FN Pickett & Fils ». F.N. Pickett put bâtir cette entreprise sur des bases financières solides, fort des recettes apportées par l'exploitation exclusive de ses inventions (brevetées) dans le domaine de l'électromécanique. Entrevoyant dans les centaines de milliers de tonnes de munitions, armes et matériels en tout genre, délaissées lors de la cessation des hostilités par les armées dans le nord de la France et de Belgique, un « gisement » de matières secondaires (fer, acier, cuivre, laiton, plomb, zinc, étain, nitrates et explosifs, etc.) dont il pouvait tirer profit, il se lança dans une aventure industrielle inédite, invraisemblable, celle de transformer des déchets de guerre par centaines de milliers de tonnes en matières secondaires valorisables et rémunératrices. Il s'agissait de réinjecter les fruits de l'économie et de l'industrie de guerre dans celles de la reconstruction du temps de paix. Il dota pour arriver à ses fins son entreprise d'une organisation très hiérarchique, faite de et pour d'anciens militaires hauts gradés de l'Armée britannique. Il s'adjoignit les services controversés du général Régnier (ancien Commandant de l'Artillerie de la 6e Région militaire) au poste d'inspecteur général vers 1921 et de l'officier scientifique artilleur russe Michael Kostevitch en charge de la sécurité.

Francis Norman Pickett signa en avril 1920 son premier contrat dénommé « Français » avec le Ministère de la Guerre en gré à gré pour l'éradication de 25 000 tonnes de munitions ex-allemandes entreposées en forêt de Trélon et Liessies (département du nord), sous la pression notamment d'association d'anciens combattants. Il érigea son usine *C-Factory* où il expérimenta, développa et mit en œuvre les nouvelles méthodes de Michael Kostevitch. Ce personnage rocambolesque, tour à tour espion pour les russes puis pour les Allemands, mais brillantissime penseur des poudres et explosifs, imagina et organisa les processus de démantèlement des munitions pour optimiser en toute sécurité la récupération des matières valorisables, prônant une véritable « Taylorisation », hautement spécialisée et technique de la destruction des engins de guerre. Ses méthodes furent expérimentées et développées dans l'usine *C-Factory*, au prix d'accidents, de nuisances et de pollutions que subirent les populations riveraines qui protestèrent contre ces activités de guerre. Pickett fit de sa *C-Factory* une vitrine par la démonstration de ses savoir-faire, ce qui lui amena de nouveaux contrats.

Le 1er juin 1920, il contractualisa alors avec le *Disposal Board*, avec le « contrat des cylindres » qui prévoyait la vente par le Ministère de la Guerre britannique de tous les cylindres à gaz qu'ils soient pleins ou vides, qu'ils soient britanniques ou allemands mais collectés dans la zone britannique. Puis le 14 juin 1920, après moult négociations, il s'engagea après versement d'un acompte, à acheter au gouvernement britannique pour 2 000 000 livres Sterling quelques 350 000 tonnes de munitions britanniques en surplus entreposées dans le nord de la France. Pickett fut rendu adjudicataire des contrats « britanniques », et « belge », pour l'ouverture de son usine *B-Factory* de Westroozebeke en Flandre occidentale et la neutralisation de 32 000 tonnes d'engins livrés par l'armée belge en 1921. Puis vinrent, suite aux défaillances d'autres industriels britanniques, les contrats de Conteville et Bourbourg, respectivement dans la Somme et dans le Nord. Au total, Pickett se retrouva avec un portefeuille de plus de 400 000 tonnes à détruire. Il ouvrit pour cela 19 usines, employant plus de 4 000 personnes, rassemblant une main d'œuvre essentiellement masculine, très hétéroclite, faite, comme dans les autres chantiers de désobusage de l'entre-deux-guerres, de travailleurs locaux (hommes et femmes), des indochinois mais aussi des immigrés, provenant du Maghreb, des Pays de l'Est et de la Péninsule Ibérique pour compenser les manques de main d'œuvre locale dans la sortie de guerre et celle qui disparaissaient alors, celle des Prisonniers de Guerre. La passation de consignes de sécurités claires se heurta aux barrières de la langue, formant ainsi un terreau propice aux accidents. Ses usines furent placées sous le contrôle technique de l'Artillerie française des Régions militaires concernées. Sa plus grande installation (*D-Factory*) fut celle de Dannes Camiers (Boulonnais, département du Pas-de-Calais), implantée au plus près d'un grand dépôt britannique dans des champs dunaires, et où l'industriel démoli au moins 110 000 tonnes de munitions, profitant et subissant aussi cet environnement pour mener à bien ses opérations. Ce site de désobusage possédait une réelle dimension industrielle.

Le parcours d'obstacles des opérations de liquidation des surplus de guerre par F.N. Pickett & Fils.

Mais Pickett fut rapidement confronté, dès l'ouverture de son chantier de Trélon, à des difficultés majeures, en partie partagées avec d'autres industriels du désobusage mais aussi spécifiques à cette entreprise, qui transformèrent peu à peu son ambitieuse aventure industrielle en chemin de croix. Inédites furent pour lui ces opérations, elles l'étaient aussi pour une administration française à repenser, à réorganiser dans le but de faire cette transition inouïe entre une guerre d'une violence jamais vue vers un temps de paix où tout restait à reconstruire. Les exploitations Pickett furent conduites comme pour d'autres industriels du désobusage en France, dans un brouillard administratif, caractérisé par l'absence de cadre réglementant (i) ses activités si spécifiques, temporaires, dangereuses, mais inédites, et (ii) la sécurité interne et externe à ses usines. L'administration tenta d'appliquer à défaut, en vain, sa réglementation du temps ordinaire et, balbutiante, hésitante chercha à trouver des compromis entre le respect de la réglementation et l'intérêt général, celui de voir disparaître dans les meilleurs délais et des conditions de sécurité acceptables les surplus de guerre. Les temporalités des réactions et prises de décision de cette nébuleuse administrative n'étaient pas celles imposées par l'urgence à liquider sur le terrain les surplus de guerre et aux tempos des procédés de destruction.

Pickett fut confronté à d'autres difficultés liées à la typologie des munitions déchargées, et à son statut de plus grande entreprise de direction britannique en France.

Les écueils qu'il eut à surmonter furent d'abord techniques, avec des difficultés de déchargement d'engins allemands de la fin de la guerre aux chargements impurs et de piètre qualité. Les obus chimiques d'une grande diversité et pour certains dépréciés nécessitaient des ajustements techniques permanents.

Pickett projeta un temps d'immerger des obus chimiques ex-allemands en mer du Nord, le rebutage de ces engins ayant été jugé trop risqué et insuffisamment rémunérateur, avant de se rétracter suite à de possibles développements de procédés rendant la neutralisation de ces engins enfin profitable.

Pickett eut à subir les différends diplomatiques entre la France et son ancien allié britannique concernant le paiement par l'Allemagne des réparations de guerre. Pickett fut soumis au contrôle de l'armée française et belge et aux contraintes administratives françaises pour l'exécution de son contrat « belge » (Westroozebeke) et de ses contrats « français » (Trélon, Sissonne, Saint-Erme, « Place à gaz ») tandis que la majorité de ses contrats étaient « britanniques » sur le sol français, soumis à la réglementation française dont le donneur d'ordre était le *Disposal Board* britannique. Cette imbrication d'intérêts français et britanniques par l'entremise de l'entreprise Pickett, acteur majeur de la libération des sols de France des restes de guerre, fut exploitée sur le plan diplomatique par l'Etat français pour tenter de faire plier les Britanniques à ses exigences. Deux embargos imposés par la France sur l'exportation des métaux de récupération qui furent levés après d'âpres négociations empêchèrent Pickett d'écouler sa marchandise sur le marché britannique au moment où les cours des métaux de récupération étaient favorables, cours qui s'effondrèrent avec l'amorce de la crise économique mondiale de la Grande Dépression. Ses livraisons à la Grande Bretagne furent par ailleurs aussi suspendues par la grève des mineurs (paralysant la branche de l'industrie sidérurgique). Pickett n'eut d'autre alternative que d'exploiter son usine de Trélon à perte.

Pickett devint la cible de campagnes de presse violentes à l'encontre de son organisation et de son personnel, attisées par de nombreux incidents et accidents souvent mortels survenus au sein de ses usines qui vinrent entacher l'image de l'industriel qui n'avait pas besoin d'une telle publicité. Ces accidents étaient inévitables vus les importants tonnages d'engins dangereux traités et la difficulté en interne de faire passer des consignes claires et rigoureuses de sécurité vers un personnel souvent immigré parlant plus de 10 langues étrangères.

Le déclin de l'entreprise F.N. Pickett & Fils (1926-1932)

Les conditions de clôture de ses chantiers restent obscures. Trélon fut démantelé par un de ses anciens employé (W. Gilbert en 1924) sous contrat français. Il poursuivit en France par de petits chantiers à Sissonne (entre 1925 et 1926). Puis on retrouve ses traces bien plus tard vers 1926 en Meuse, en forêt de Spincourt, où il détruisit, pour le compte de l'Artillerie de la 6e Région militaire et du Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stock, des obus chimiques ex-allemands (dont une majorité d'engins à *Croix bleue*) par brûlage, vraisemblablement un stocks de plus de 200 000 d'engins laissé là par la vacance d'un autre industriel qui possiblement n'avait pas les moyens techniques de procéder à des neutralisation dont Pickett avait fait la preuve de sa parfaite maîtrise. La question reste posée pourquoi il fut autorisé par contrat à démolir des engins que le général Régnier, contrôleur technique au sein de la maison Pickett, avait rassemblé en forêt de Spincourt en 1919 alors commandant de l'Artillerie de la 6e Région militaire? Le général, trainé devant les tribunaux, fut sauvé au terme d'une procédure pénale par ses anciens compagnons d'arme et officiers, le protégeant (dont le général Hirschauer). Les résidus de brûlage générés et leurs pollutions associées, visibles, firent connaître ce terrain de brûlage (*Burning Ground*) sous le nom de « Place à gaz ».

L'entreprise F.N. Pickett & Fils fut déclarée banqueroute le 7 juillet 1932. Cet homme passionné par le sport automobile, de golf et les bergers allemands sembla avoir connu dans son existence postérieurement à son aventure industrielle en France, des difficultés personnelles notoires non renseignées dans les documents consultés.

Bilans. Tonnages démolis et nombre de sites de destruction de REG en France

L'agrégation de données chiffrées relatives aux quantités démolies dans l'entre-deux-guerres conduit à une estimation réaliste de plus de 2 000 000 de tonnes. On rappelle ici qu'un ordre de grandeur de 10 millions de tonnes a pu être avancé dans cette recherche concernant le tonnage de munitions tirées majoritairement sur le front occidental et que les surplus dans l'immédiate sortie de guerre s'élèveraient à 1 700 000 tonnes. Avec un taux de dysfonctionnement des munitions de 25%, le tonnage tiré non explosé se situerait aux alentours de 2 500 000 tonnes. Le tonnage démoli représenterait donc à minima 20% du tonnage tiré sur le front occidental et 47% du tonnage des surplus et Restes Explosifs de Guerre tirés. Le Tableau 35 rassemble les données quantitatives collectées à la faveur de cette recherche concernant les munitions, poudres et explosifs. Ces chiffres sont pleinement illustratifs de la démesure des moyens dédiés à la destruction de masse durant la Première Guerre mondiale.

Item	Quantités	Unités
Tonnage de poudres et d'explosifs produit par les parties combattantes du front occidental	~3 400 000	Tonnes
Nombre de tirs d'artillerie de campagne et d'artillerie lourde sur le front occidental	~1 000 000 000	Tirs
Nombre de tirs de projectiles de tranchée et grenades	~1 000 000 000	Tirs
Tonnage approximatif des engins tirés	~10 000 000	Tonnes
Nombre de projectiles d'artillerie non explosés (UXO)	~10 000 000 -30 000 000	Engins
Tonnage approximatif des projectiles non explosés (UXO)	~2 500 000	Tonnes
Tonnage de munitions en surplus à l'armistice	~1 700 000	Tonnes
Tonnage de munitions détruites dans l'entre-deux-guerres	~2 000 000	Tonnes
Tonnage de poudres et explosifs renfermé dans les engins à détruire	~500 000	Tonnes

Tableau 35 : Données chiffrées relatives à la production, à l'utilisation et à la destruction de munitions, poudres & explosifs durant et au terme de la Première Guerre mondiale.

Les zones géographiques où furent opérées ces démolitions industrielles étaient principalement celles concernées par les grandes offensives et les violents duels d'artillerie, à savoir les 1er, 2e et 6e Régions. Elles totalisent à elles trois près de la moitié du tonnage démoli. Le tonnage considérable détruit par F.N. Pickett & Fils s'élèverait à 434 640 tonnes, soit plus du tiers du tonnage total détruit. Environ 200 sites où furent détruits des matériels et matières explosibles dans l'entre-deux-guerres ont été identifiés à la faveur d'un inventaire, non exhaustif, réalisés à la demande du Ministère en charge de l'Environnement entre 2015 et 2018, qui se répartissent pour l'essentiel dans les trois Régions militaires citées ci-avant mais aussi sur l'ensemble du territoire métropolitain, et en particulier au niveau des Etablissements de Réserves Générales de Munitions (ERGMu) et sur ou à proximité de sites de production. Les régions Hauts-de-France (44% des sites) et Grand'Est (49% de sites) rassemblent à eux seuls près de 93 % des sites de destruction de munitions identifiés.

Ont été écartés de cet inventaire les sites historiques situés dans d'actuelles emprises militaires. Trois quarts des sites identifiés correspondent à des terrains de pétardement dont les dimensions sont très variables, allant de quelques gros entonnoirs isolés à des ensembles rapprochés d'enfilades compactes d'entonnoirs de pétardement. Une trentaine de sites étaient de dimension industrielle, et certains d'entre eux, « multimodaux », ayant procédé aux démolitions par plusieurs procédés (OB, OD, etc.). Pour 60 sites l'exploitation fut conduite par des opérateurs privés (souvent sur mandat militaire) et plus de 20 par l'autorité militaire directement (Armée française mais aussi l'*American Expeditionary Force* (AEF) et le *British Expeditionary Force* (BEF)). Certains sites initialement exploités par les forces armées ont été repris par des opérateurs privés. L'industriel Léon Berge occupa, avec 18 sites, une place de première importance dans l'élimination des engins de guerre de la Première Guerre mondiale (avec le quasi-monopole dans la 1re Région militaire, à savoir les départements du Nord et du Pas-de-Calais). F.N. Pickett & Fils fut l'entrepreneur, actif dans l'entre-deux-guerres, qui posséda le plus grand nombre d'usines (12 au total).

Cet inventaire fut motivé par la découverte fortuite de pollutions sévères des sols dans un environnement aux usages sensibles (agricoles) au droit de plusieurs entités formant le complexe de désobusage Clere & Schwander dans le canton de Spincourt. Cette brutale et inattendue irruption du passé dans le présent se traduisit par une situation de crise et d'extrêmes tensions dans le monde agricole et les autorités locales et nationales concernées. Sept ans furent nécessaires pour que des solutions consensuelles furent trouvées. Cette histoire du désobusage industriel de l'entre-deux-guerres, comme les travaux de récupération, a été comme invisibilité dans l'historiographie de la Grande Guerre et de la sortie de guerre. Amnésie collective ou refoulement mémoriel ? Cette absence d'empreinte mémorielle est certainement multifactorielle (i) certains activités notamment strictement militaires (1918-1920) n'ont pas fait l'objet d'enregistrement écrits (ii) destruction et dissémination d'archives du fait de l'absence de cadre réglementant ces activités et du contrôle décentralisé des opérations par les PAR de chacune des régions militaires concernées et (iiii) possiblement un rejet, déni, de ces opérations visant des objets légués par la guerre et dont la destruction (avec bruits, éclairs, fumées des détonations) joua possiblement comme des réminiscences de la guerre que la population pacifiée désirait reléguer au passé. Enfin, certains terrains d'explosion ont été remblayés, nivelés, et disparurent des paysages, alors que subsiste à l'échelle locale, des bribes d'une mémoire, parfois biaisée.

Nombreux furent celles et ceux qui, dans le cadre de récupérations et de destructions de Restes Explosifs de Guerre datant de la Première Guerre mondiale, licites, contractuelles ou non, ou encore illicites, sur les anciennes lignes de front et les surplus des arrières, furent victimes des engins de guerre abandonnés encore en puissance d'explosion. Le nombre de tués et de mutilés est connu à l'échelle locale dans certains secteurs du front, et pour certains intervalles de temps, mais aucune statistique nationale n'a été identifiée dans le cadre de recherche concernant l'entre-deux-guerres. Il s'élève sans aucun doute à plusieurs centaines. Décriées, fustigées par voie de presse, mal acceptées par les populations civiles sinistrées et déplacées, les entreprises du désobusage furent en effet mues par le gain et la recherche du profit. Jamais ne fut posée la question du nombre de vie que leur sacrifice sût préserver.

L'arrêt du désobusage et de la récupération industriels et contractuels avec la Seconde Guerre mondiale

Presque 10 ans furent nécessaires pour reconstruire mais pendant plus de 30 ans des industriels s'affairèrent aussi à liquider les surplus et restes de guerre accumulés en France, Belgique, Allemagne et en Grande Bretagne au terme de la Grande Guerre. Le désobusage des anciens champs de bataille de la Grande Guerre ne fut pas mené jusqu'à son terme, lorsque la Seconde Guerre fut déclarée.

Les dernières traces d'activité de ces désobuseurs datent de 1941 avec le chantier Berge de Fampoux, dont le terrain d'explosion dut être déplacé à la demande des autorités militaires allemandes *(Kreisskommendatur* d'Arras). La récupération et le désobusage industriel sous contrat visant les engins de la Grande Guerre cessa avec la Seconde Guerre mondiale. Les exigences de désobusage et d'éradication d'engins de guerre changèrent alors de finalité et d'objet : la France fut contrainte par les Commissions allemandes et italiennes d'armistice (CAA, CIA) à détruire en quelques semaines seulement, dans des délais irréalistes qui rappelaient ceux imposés à l'Allemagne par le *Diktat* français de 1919, une grande partie de ses stocks de munitions, et permettre à l'Allemagne, en toute quiétude, avec une France démilitarisée, d'engager la bataille d'Angleterre.

D'autres surplus de 1914-1918 attendirent les années 50, que des solutions techniques économiquement supportables furent trouvées pour décharger certains obus chimiques entreposées dans des sites de production et ateliers de chargement. L'histoire des REG à détruire débute au XIXe siècle, elle traverse la Première Guerre mondiale, atteint un climax dans l'immédiate sortie de guerre, pour s'achever suivant un continuum sur sa dimension industrielle après la Seconde Guerre mondiale

Aujourd'hui encore, les démineurs de la Sécurité civile, évacuent et détruisent tous les ans des centaines de tonnes de munitions anciennes (400 à 750 tonnes / an toutes guerres confondues) découvertes et mises à l'affleurement à la faveur de travaux agricoles, de terrassements, de curages d'étangs ou de cours d'eau. Selon ces professionnels, des centaines d'années seraient encore nécessaires avant d'en venir à bout avec cet héritage de fer légué dans nos sols par cet évènement paroxystique de la violence guerrière que fut 1914-1918, orchestrée par l'Artillerie, sur le front occidental.

VOLET ENVIRONNEMENT
L'empreinte environnementale de la Grande Guerre

Fingerprint centenaire d'un conflit majeur sur les sols et les eaux souterraines

Grenades, fusées et obus en cours de corrosion. Champ de bataille de Vimy Thélus (département du Pas-de-Calais)[1737]

[1737] Collection particulière, Cardem-Py. Communication personnelle.

Introduction générale & problématique posée

1. Anomalies (hydro)géochimiques, pollutions concentrées et risques

Les sols sur lesquels nous évoluons sont formés par des associations de minéraux, constitués d'éléments chimiques naturellement présents dans les roches constituant la lithosphère, comme le silicium, l'aluminium, le calcium, le sodium, le potassium et des métaux (fer, manganèse), associés à des éléments traces métalliques (métaux *sensu stricto* comme le cuivre, le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb, le zinc, etc. et métalloïdes comme l'arsenic, le sélénium, etc.) (ETM). Peut s'y adjoindret de la matière organique sous différentes formes. Cette composition des sols forme le fond géochimique naturel qui généralement a été modifié par l'activité humaine notamment depuis l'industrialisation. Les eaux souterraines possèdent aussi leur composition spécifique (minéralisation) dépendante (i) de la nature minéralogique et chimique du réservoir aquifère dans lequel elles circulent et (ii) de leurs interactions avec d'autres masses d'eau. Des émissions chroniques et diffuses d'ETM et de certains composés organiques persistants (formant la famille des POP, *Persistent Organic Compounds,* comme les dioxines et furanes *(*PCDD & PCDF, PolyChloroDibenzo Dioxines & PolyChloroDibenzo Furanes), les PCB (PolyChloroBiphényles), ou encore les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)) modifient à grande échelle la composition des sols mais aussi des eaux souterraines (le fond naturel hydrochimique). L'état habituellement rencontré de l'environnement dans lequel nous évoluons n'est plus naturel mais a été définitivement anthropisé.

L'introduction par l'action humaine d'éléments et/ou de composés appartenant ou non au fond géochimique anthropisé peut dégrader cet environnement qui va ainsi s'écarter de l'état habituellement rencontré, générant de la sorte des anomalies géo- ou hydro-chimiques. Ces activités humaines peuvent être industrielles, agricoles ou encore militaires, par exemple, à la faveur des grands conflits. Cette introduction peut être quasiment instantanée, à la suite d'un accident, ou s'effectuer graduellement, de façon chronique, sur de longues périodes de temps.

Les projectiles, pétards, charges explosives et autres artifices utilisés par millions durant la Grande Guerre étaient des matériels et matières manufacturés constitués d'éléments chimiques (métaux et métalloïdes), de sels (association de cations (sodium Na^+, potassium K^+, ammonium NH_4^+, etc.) et d'anions (nitrate NO_3^-, chlorate ClO_3^-, perchlorate ClO_4^-, etc.)) et de molécules organiques (NAC comme le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT), etc.), voire organométalliques (arsines, fulminate de mercure, azotures, etc.) pour l'essentiel produites par la chimie de synthèse (molécules de synthèse dites « xénobiotiques »). Les munitions s'assimilent à des capacités fermées renfermant des composés chimiques énergétiques (explosifs), incendiaires, fumigènes et/ou agressifs (*Ypérite*, etc.). L'usage, le stockage et la destruction en masse des armes et des matières explosibles peuvent avoir introduit dans les sols et les eaux une grande variété de métaux et de composés chimiques, entrant dans leur composition, qui peuvent persister dans l'environnement et modifier ses propriétés initiales, naturelles, sur de longues périodes de temps.

Tous ces éléments et substances chimiques, qu'elles soient naturelles ou non, introduits dans l'environnement possèdent des propriétés intrinsèques (toxiques, cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques, d'inflammabilité, etc.), susceptibles de les rendre dangereux et préjudiciables pour la santé, les écosystèmes, biens matériels, la ressource en eau

Des effets néfastes sur la santé se manifestent dès que des personnes (usagers des milieux sols, eaux, air) sont exposées, c'est-à-dire entrent en contact (via des modalités de transfert) avec les substances dangereuses et peuvent les intégrer à leurs organismes. Lorsque le triptyque substance dangereuse / transfert / usagers est réuni, la survenue d'un aléa est rendue possible, c'est-à-dire qu'une situation à risque a été générée.

Les voies d'exposition constituent les modalités selon lesquelles des substances dangereuses sont mises en contact avec un organisme. Elles sont dites directes lorsque les usagers sont mis en contact directement avec les matrices dégradées (inhalation d'air ambiant, ingestion de terre, d'eau, etc.) ou indirectes, lorsque la mise en contact s'effectue par l'intermédiaire de denrées alimentaires polluées par une matrice polluée (exemple de l'ingestion de légumes ayant poussé sur des sols pollués).

Les anomalies géo- ou hydro-chimiques, qui s'écartent de l'état habituellement rencontré de l'environnement, sont qualifiées de « pollution » dès qu'elles sont susceptibles de générer des nuisances. La définition d'une pollution est qualifiée par la directive 96/61 CE du Conseil du 24/09/96 (Directive IPPC) selon ces termes *« Introduction directe ou indirecte, par l'activité humaine, de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans les milieux air, eaux ou sol, susceptibles de porter atteinte à la Santé humaine ou à la qualité de l'Environnement, d'entraîner des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'Environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier* ». « *Un site pollué est site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement*[1738] ».

La gestion des sites et sols pollués en France comme dans la plupart des pays ayant connu une longue histoire industrielle (pluri centenaire), à l'origine d'un passif environnemental, repose sur cette notion de risque. La priorité pour les gestionnaires de l'environnement est la préservation de la santé des populations, et pour cela il convient dans un premier temps de connaître la nature des éléments et composés dégradant les milieux d'exposition, l'ampleur et l'extension des dégradations (étape de diagnostic), puis d'évaluer en quoi et à quelle hauteur elles peuvent être préjudiciables pour les populations exposées. Cette évaluation des risques vise à estimer si oui ou non les usages des milieux sont compatibles avec leur état (démarches d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) au sens des textes d'avril 2017 du Ministère en charge de l'Environnement encadrant la gestion des sites et sols pollués).

Ce qui importe dans les évaluations des risques en lien avec des pollutions environnementales n'est pas uniquement la teneur[1739] ou la concentration[1740] d'une substance donnée dans une matrice et un milieu anomalique dégradé, mais bien la quantité de cette substance qui est intégrée journellement à l'organisme et rapportée au poids corporel (la Dose Journalière d'Exposition (DJE) en mg/jour/unité de poids corporel) des usagers des milieux. Le calcul de la DJE est central dans le calcul des risques (démarche d'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS)).

[1738] ActuEnvironnement. Dictionnaire environnement. Définition. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/site_et_sol_pollue.php4

[1739] Masse d'une substance donnée rapportée à la masse de la matrice, en mg de polluant / kg de sol, ou ppm (partie par million).

[1740] Masse d'une substance donnée rapportée au volume de la matrice, en mg de polluant / litre d'eau, mg de polluant / m^3 d'air.

Les risques calculés, permettant d'approcher « artificiellement » et par majoration (en vertu du principe de précaution). les risques réels, qu'ils soient liés aux effets toxiques à seuil[1741] ou aux effets cancérigènes au sens large sans seuils[1742], sont toujours proportionnels à la DJE.

Ce principe de la dose fut énoncé par Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, mieux connu sous le nom de Paracelse, en ces termes « *Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis machts, daß ein Ding kein Gift sei*[1743]. » « Tout est poison, rien n'est poison : c'est la dose qui fait le poison ». Les expositions répétées à de faibles doses mais sur de longues périodes de temps (expositions chroniques) se manifestent par des effets néfastes sur la santé qui sont de deux ordres : effets toxiques, réversibles et les effets CMR (Cancérigènes, Mutagènes et Reprotoxiques), irréversibles. Ces effets sont dits systémiques car ils se manifestent sur des organes qui ne coïncident pas nécessairement à ceux à l'origine des expositions (des expositions par ingestion ne se traduisent pas systématiquement par des effets sur le système digestif).

Les risques calculés sont proportionnels à la DJE dépendante de la teneur ou de la concentration en un élément ou une substance donnés dans une matrice au point d'exposition. Les situations à risque correspondent donc aux zones de pollution concentrée générées par l'introduction sur des aires géographiques restreintes, généralement d'extension limitée, de grandes quantités d'éléments et/ou substances intrinsèquement dangereuses. Les pollutions concentrées s'opposent aux pollutions « diffuses » lorsque les pollutions concernent des secteurs géographiques étendus. Les concentrations et teneurs sont alors généralement faibles et il n'est pas toujours faisable d'en identifier les sources et origines. Le cas le plus connu de pollution diffuse est celui des pollutions des eaux souterraines par les pesticides. A l'opposé, les zones concentrées nécessitent pour leur formation que des mécanismes de concentration aient été à l'œuvre. Une analogie peut être établie avec la genèse des gîtes métalliques dans le sous –sol géologique opérée à la faveur de zones « réactives » quasi statiques où, au fil du temps, par des processus physico-chimiques, les métaux et autres éléments se piègent et s'enrichissent.

Cette énonciation objective et technicienne du risque lisse et cache des dimensions totalement subjectives du risque, bien plus nuancées. La gestion des risques est avant tout celle du risque perçu et subi (en opposition aux risques consentis) « *La pollution est essentiellement un jugement de valeur sur ce que chacun souhaite trouver dans l'environnement ; ce jugement est – ou n'est pas – étayé par des données scientifiques et implique presque toujours un choix*[1744] ». L'exposition chronique d'usagers des milieux environnementaux est généralement subie et imperceptible. Les teneurs et concentrations à partir desquelles des effets sur la santé peuvent se manifester sont généralement basses. Ces pollutions n'ont ni couleur, ni odeur, ni saveur.

[1741] Le risque est quantifié par le Quotient de danger, rapport entre la DJE et une dose journalière tolérable (DJT), pour les effets toxiques. Les effets toxiques sont réversibles avec l'arrêt des expositions, et se mesurent en terme de gravité qui est d'autant plus prononcée que les doses dépassent les DJT sont élevées.

[1742]Le risque est quantifié par l'Excès de Risque Individuel (ERI), qui résulte du produit entre la DJE et l'Excès de Risque Unitaire (ERU). Le risque cancérigène au sens large est irréversible et s'exprime en terme d'excès de survenue d'un effet néfaste par rapport à une population de référence exposée par ailleurs dans les mêmes conditions (approche probabiliste). Plus la probabilité de survenue est élevée, plus le risque est élevé.

[1743] Paracelsus (1538). *Die dritte Defension wegen des Schreibens der neuen Rezepte. Septem Defensiones 1538*. Werke Bd. 2, Darmstadt 1965, p. 510.

[1744] Bang, F.B. (1980). *Monitoring pathological changes as they occur in estuaries and in the ocean in order to measure pollution (with special references to invertebrates).* Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor.Mer, 179, 118-24.

Par ailleurs, la notion de risque liée à notre environnement est abstraite, étrangère à nos représentations. L'homme a été programmé pour fuir des risques imminents et visibles, face à des prédateurs ou ennemis qui peuvent nuire à sa survie et « *nous avons du mal à nous rendre compte des changements progressifs, imperceptibles, de notre environnement*[1745] ».

2. Zones de pollution concentrées potentielles de la Grande Guerre

La concentration de combattants et/ou de réfugiés à proximité du front comme à l'arrière, la présence de nombreux cadavres en putréfaction sur la ligne de front, les latrines des campements densément peuplés se traduisirent pendant certaines guerres (comme la Grande Guerre) voire dans l'immédiat après-guerre par des pollutions bactériennes et pathogènes locales des eaux souterraines. Ces perturbations de l'environnement, bien qu'ayant entraîné des effets délétères parfois spectaculaires par leur ampleur[1746], furent temporaires et réversibles. Ces environnements dégradés du passé n'intéressent pas le temps présent. Nous intéressent, les substances et composés persistants dans l'environnement susceptibles de le dégrader plus de cents ans après y avoir été introduits.

Les faits de guerre des épisodes de mouvements, d'une durée limitée sur de vastes espaces, sont peu propices à rassembler ces conditions de masse et concentration. Les guerres de position durant lesquelles de grandes quantités d'explosifs et de munitions (produits chimiques) furent déversées sur une superficie restreinte peuvent rassembler les conditions nécessaires à la genèse de zones de pollutions concentrées. Sont particulièrement concernés les secteurs « actifs » du front occidental durant la Grande Guerre, théâtres de combats et bombardements violents et répétés se traduisant par des densités de tirs élevées et donc statistiquement par des cumuls d'UXOs particulièrement importants.

Le volet historique de cette recherche met clairement en exergue deux autres situations inédites dans lesquelles les concentrations d'engins de guerre et donc potentiellement de substances chimiques susceptibles d'avoir été introduites dans les sols, peuvent s'avérer bien plus problématique pour l'environnement que les UXOs distribués sur les secteurs intensément bombardés du front, mais s'évaluant en km^2. Il s'agit des grands dépôts des surplus de guerre à liquider constitués dans les arrières, loin du front, distribués sur l'ensemble du territoire métropolitain, et plus près du front, les dépôts où furent rassemblés (concentrés) intentionnellement les REG abandonnés par les actions de récupération entreprises par les armées françaises et leurs alliés sur le territoire français. Enfin, les secteurs de guerre de mines sont également à considérer comme des sources potentielles de pollutions concentrées d'origine pyrotechnique du fait de l'usage, puis de l'abandon, sur terre et sous terre de grandes quantités d'explosifs sur des aires géographiques restreintes.

[1745] Ornstein, R. Ehrlich, P. (1989). *New World, New Mind : Changing the Way we Think to Save our Future*. Paladin, Grafton Books, London.

[1746] Avant la première Guerre mondiale, le manque d'hygiène et les pollutions pathogènes des eaux firent plus de mort durant les conflits armés que par l'usage des armes.

3. Problématisation et articulation de la recherche environnementale

L'usage et la destruction des munitions et matériels explosibles, des ergols solides (poudres) et explosifs, ont pu être à l'origine de l'introduction dans les sols des mélanges de substances chimiques énergétiques susceptibles de détoner ou déflagrer, mais aussi, une fois exposés à l'environnement, de dégrader durablement la qualité des sols et/ou des eaux. L'hypothèse d'une dégradation durable de l'environnement par (i) les faits et pratiques militaires durant le conflit et/ou (ii) les opérations de récupération et de destruction des REG durant la guerre et plus encore durant l'entre-deux-guerres apparaît plausible au regard des éléments techniques et historiques dans ce qui précède.

L'objectif du volet environnemental de cette recherche est d'abord de comprendre, au regard des éléments historiques exposés dans le volet historique précédent, comment, par quel(s) phénomène(s), l'usage et/ou la destruction centenaires, à grande échelle, de matériels et matériels explosibles et agressifs caractéristiques de la Grande Guerre peuvent être à l'origine de dégradations actuelles de la qualité des sols et/ou des eaux souterraines. Cette recherche explore donc les modalités d'introduction dans les sols et/ou les eaux de composés d'origine pyrotechnique en lien avec (i) l'usage des munitions et les différents régimes de détonation à l'issue des tirs, avec en creux la question de la pollution des sols des terrains fortement bombardés (Section 1e), (ii) la destruction des Restes Explosifs de Guerre par pétardement (*Open Detonation*) (Section 2e), puis (iii) la neutralisation des engins de guerre par le brûlage (*Open Burning*) et les autres pratiques de déchargement (Section 3e). Cette recherche se base sur des données et informations tirées de la littérature scientifique publiée mais aussi sur des résultats originaux acquis et/ou rassemblés dans le cadre de cette recherche, et propose de caractériser, sur le plan physique et chimique, ce qui fait la singularité distinctive et la généralité du marquage environnementale des sites et secteurs soumis aux trois grandes modalités d'usage et de destruction de matières et matériels énergétiques.

Puis se pose la question de l'existence de cette empreinte environnementale sur les eaux souterraines (Section 4e). Il s'agit en particulier d'apprécier si la qualité des eaux souterraines, sollicitées pour l'alimentation en eau potable (EDCH, Eaux Destinées à la Consommation Humaine), reconnues marquées par les ions perchlorate (ClO_4^-) entre 2011 et 2015 à l'échelle régionale dans le quart nord-est de la France, a été, est encore, et/ou sera influencée par des résidus de matières explosibles et/ou agressives de la Grande Guerre. A cette date aucune recherche publiée ne vient établir un lien entre les conflits majeurs du XXe siècle et la dégradation de la qualité des eaux souterraines à l'échelle des anciennes lignes de front. Cette démarche de recherche implique de caractériser l'empreinte spécifique (*Fingerprint*) de ces résidus centenaires dans des eaux dont la qualité est susceptible d'être influencée et modifiée par ailleurs par de nombreuses activités anthropiques autres que la guerre (industrie, agriculture). La question des origines militaires et/ou agricoles anciennes des ions perchlorate dans les eaux est posée.

Enfin, le cas échéant, il s'agit de proposer des hypothèses les plus plausibles concernant (i) la nature, la composition chimique, des sources actuelles entretenant cette empreinte environnementale, (ii) leurs origines historiques et (iii) les mécanismes en jeu expliquant la distribution spatiale et temporelle des composés formant cette empreinte.

Section 1e. Munitions et engins de guerre tirés sur le front occidental. Sources anciennes de pollution actuelles des champs de bataille ?

1. Introduction de la Section 1e

Le volet historique du présent manuscrit décrit comment les moyens de l'Artillerie, restés dans l'ombre de l'Infanterie dans les doctrines militaires du XIXe siècle, s'imposèrent rapidement, avec le déclenchement de la Première Guerre mondiale, comme une arme capitale et décisive dans la conduite de la guerre. On passa à l'été et l'automne 1914, en quelques semaines d'un conflit du XIXe siècle à un conflit d'un type nouveau, une guerre moderne, industrielle et des machines. La violence, la puissance de cette arme, le nombre de pièces engagées au combat, sans précédent, ne cessèrent de croître durant le conflit, au même titre que la diversité des calibres et des chargements des projectiles qui se spécialisèrent. Des quantités phénoménales de matières explosives et agressives sortirent des usines de guerre mobilisées dans l'effort de guerre, pour charger des quantités astronomiques de projectiles qui furent tirés sur l'adversaire et le champ de bataille, dont au moins un quart d'entre eux furent défaillants, polluant de la sorte les sols bombardés par les UXOs.

Les bombardements menés par l'Artillerie, d'intensité variable selon les secteurs du front, ont-ils été, voire seront-ils le temps passant, à l'origine de l'introduction dans les sols de composés d'origine pyrotechnique issus des chargements et des éléments constitutifs des munitions avec en creux la question récurrente, aux réponses laissées jusqu'à présent vacantes, du degré de dégradation de la qualité des sols et/ou des eaux souterraines sur et au droit des anciens champs de bataille « marmittés » ? Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, il s'avère nécessaire d'étudier, au regard des différents régimes de fonctionnement ou de dysfonctionnement des engins tirés et de l'état des connaissances de la recherche actuelle sur la question de l'impact environnement des tirs d'artillerie, (i) par quel(s) mécanisme(s) le chargement des projectiles, constitué de substances chimiques potentiellement polluantes, mais initialement confiné dans le *casing* métallique des engins, peut être mis au contact de l'environnement (impliquant l'ouverture du *casing*), puis (ii) sous quel état physique se trouve ensuite ce chargement déconfiné et exposé à l'environnement naturel. Le potentiel polluant des bombardements est directement dépendant, quels que soient les contextes hydrogéologiques, (i) des densités tirées (en tonnes d'engins par km^2) et donc du tonnage de polluants potentiels vectorisé sur la cible, (ii) des régimes de détonation ou d'absence de détonation à l'impact, et (iii) pour les engins détonés, de l'état physique et du degré de dispersion des résidus issus des chargements.

Cette première section du volet historique décrit dans un premier temps (i) quel est le devenir des munitions tirées puis dans un second temps, (ii) quelles sont les modalités d'introduction dans les sols des composés d'origine pyrotechnique selon les régimes de détonation, en s'appuyant notamment sur des retours d'expérience étrangers et des recherches menées en Amérique du Nord sur des champs de tirs actifs. Deux situations sont étudiées : 1) la libération instantanée de résidus d'explosifs lors de détonations, complètes ou incomplètes, de projectiles tirés, 2) la libération différée de résidus d'explosifs au terme d'un processus d'altération (corrosion) des parois métalliques (*casings*) d'engins non éclatés (UXOs).

2. Les régimes de fonctionnement et dysfonctionnement des munitions tirées

On rappelle ici que les projectiles tirés peuvent suivre trois régimes, connut des artilleurs durant la guerre (cf. Figure 116).

Dans le premier cas, le projectile fonctionne normalement comme escompté et détone intégralement au moment souhaité imposé par le fonctionnement des fusées (avant, au moment ou après l'impact avec le sol ou la cible). Ce régime est dénommé détonation de haut-ordre ou selon la dénomination anglo-saxonne *High-Order Detonation* (acronyme HOD). Le chargement est quasiment intégralement décomposé et le corps des projectiles est lacéré et dispersé autour du point de détonation en une myriade de fragments métalliques de toutes tailles, parfois particulièrement contendants (éclats). Dans le cas des projectiles à chargement chimique, l'enveloppe métallique formant le réservoir des agents agressifs (toxiques de guerre) est partiellement déchirée par la détonation de haut-ordre d'une petite charge explosives contenue dans le chargement ou dans la seule gaine d'éclatement.

Le second cas de figure est celui d'une détonation dysfonctionnelle, partielle (déflagration), désignée par détonation de bas-ordre ou selon la dénomination anglo-saxonne *Low-Order Detonation* (acronyme LOD). Les projectiles s'ouvrent, se fragmentent, sans être intégralement disloqués, en expulsant une partie de leur chargement.

Le troisième cas de figure est celui des projectiles qui ne fonctionnent pas, et n'amorcent aucune forme de détonation, donnant naissance aux UXOs formant la pollution pyrotechnique des sols bombardés. Le rendement peut être exprimé aussi par le taux de « ratés », ce que les anglo-saxons désignent par *duds* et les Allemands (*Blindgänger*). Ces engins qui n'ont pas explosés forment les UXOs acronyme anglo-saxon pour *UneXploded Ordnance*.

Ces deux derniers régimes de fonctionnement sont qualifiés d'incident de tir dont les causes sont explicitées dans la Section 4h du présent manuscrit.

La Figure 265 donne des aperçus photographiques d'UXOs datant de la Première Guerre mondiale au moment de leur découverte sur le terrain.

On parle de détonation « par sympathie » (« *sympathetic detonation* » ou « *SYDET* ») lorsque la détonation d'un engin est provoquée par la transmission de l'onde de choc d'une autre détonation de haut-ordre proche voisine. A noter que cette distinction des modalités de fonctionnement des projectiles en trois grandes catégories vaut aussi pour les fourneaux explosifs offensifs ou défensifs utilisés dans la guerre de mines.

Figure 265 : UXO au moment de leur découverte. Aperçu photographique, a) Bombe de tranchée française empennée à ailettes 58T DLS en cours de corrosion (Juvincourt, département de l'Aisne), b) Bombe de tranchée française empennée à ailettes 58T DLS en position d'impact (Juvincourt, département de l'Aisne), c) Fusée d'artillerie montrant encore son marquage de peinture (Beaumont-en-Verdunois, département de la Meuse), d) Projectiles d'artillerie de tranchée britanniques (Vickers et Stokes), grenades à manche allemandes et grenade française à tromblon (Thélus, département du Pas-de-Calais), e) Projectile tiré et non explosé de 150 mm montrant sa double ceinture en zinc rayée, attestant de son passage dans les rayures internes de l'âme du canon (Ravin du Helly, Douaumont, département de la Meuse), f) Projectiles d'artillerie de tranchée britanniques (Stokes). et, à droite, une bombe de tranchée française empennée à ailettes T58 (Thélus, département du Pas-de-Calais)[1747].

[1747] Collection particulière, Cardem-Pyro. Communication personnelle.

3. Modalités d'introduction dans les sols des composés d'origine pyrotechnique selon les régimes de détonation

3.1. INTRODUCTION. PHENOMENOLOGIE GENERALE

L'introduction dans l'environnement et en particulier dans les sols et les eaux de substances chimiques, organiques et/ou inorganiques, entrant dans la formulation des matériaux énergétiques anciens, présents dans les projectiles et autres engins pyrotechniques, suit un processus en deux temps. Ce phasage vaut pour les munitions et engins aux chargements fermés (confinés).

Le premier temps est celui du déconfinement. Les poudres, explosifs et autres agents agressifs constituant les chargements des projectiles et autres cartouches propulsives, étaient séparés de l'environnement par une paroi continue métallique, plus au moins épaisse, désignée par enveloppe ou, selon la terminologie anglo-saxonne, *casing*. La première étape conduisant à la mobilisation des constituants de ces chargements vers l'environnement consiste à rompre l'intégrité de cette enveloppe pour exposer le chargement aux conditions environnementales. Cette rupture s'opère violemment et instantanément lorsque tout ou partie du chargement détone (suivant un régime de haut-ordre ou de bas-ordre), comme attendu pour un projectile d'artillerie, ou de façon lente, progressive et différée pour les UXOs, initialement intègres à l'impact, lorsque les métaux des enveloppes sont altérés par les phénomènes de corrosion. Pour les fourneaux explosifs de guerre de mines, les explosifs étaient mis directement au contact de l'environnement du fait de l'absence de contenants métalliques, ces explosifs étant simplement emballés dans du papier paraffiné et placés dans des sacs en toile de jute ou des caisses en bois.

Dans un second temps, le chargement ayant été mis au contact de l'environnement, des processus se mettent en place pour mobiliser les fractions mobilisables de l'ensemble des constituants chimiques des chargements. Le mécanisme qui prévaut alors est celui de la dissolution.

Le développement qui suit établit un état des connaissances de ces deux étapes essentielles de mobilisation environnementale des composés formant les chargements.

3.2. DECONFINEMENT INSTANTANE DES CHARGEMENTS DES MUNITIONS PAR DETONATION DE HAUT-ORDRE

3.2.1 Eclairages et biais d'une recherche nord-américaine sur les champs de tir actifs ?

Il n'existe que très peu d'informations concernant l'influence des résidus d'engins de guerre sur la qualité chimique des sols, des eaux, en lien avec des détonations répétées (bombardements ou *shelling*) lors des conflits de haute intensité du XXe siècle ; les études scientifiques publiées portant sur les terrains pilonnés de la Grande Guerre sont très parcellaires et localisées comme explicité en introduction du présent manuscrit (Van Merveinne et al., (2008)[1748], Meerschman et al., (2011)[1749], Williams et al., (2022)[1750]). Toutefois des recherches approfondies ont été menées par l'ERDC (*Army Corp of Engineers. U.S. Army Engineer Research and Development Center*) pour le compte du DoD (*Department of Defence*, USA) sur des terrains régulièrement bombardés, à savoir une vingtaine de champs de tir actifs aux Etats-Unis et au Canada, pour certains d'entre eux anciens (datant de la Guerre de Sécession).

Les éléments de connaissance relatifs à la distribution des résidus d'explosifs lors de détonations d'engins de guerre sur ces champs de tir actifs, ont été synthétisés puis rassemblés dans un rapport du *Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP)* du DoD (*Departement of Defence*) publié en 2001 sous la référence « *SERDP - ER-11552 Distribution and Fate of Energetics on DoD Test and Training Ranges*[1751]», une étude sur laquelle s'appuie celle du Ministère de l'Environnement du Land de Bavière (Allemagne) visant à qualifier et quantifier les pollutions liées aux destructions par pétardement des Restes Explosifs de Guerre au terme de la Seconde Guerre mondiale en Allemagne[1752]. Six versions vinrent ensuite actualiser le premier rapport[1753].

L'objectif final de ces ambitieuses recherches était d'apporter des améliorations aux pratiques militaires et aux aménagements des sols des champs de tir pour limiter les risques de pollution à l'avenir.

[1748] Van Meirvenne, M., T. Meklit, S. Verstraete, M. De Boever, and F. Tack. (2008). *Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres? op. cit.*

[1749] Meerschman, E., Cockx, L., Islam, M. M., Meeuws, F., & Van Meirvenne, M. (2011). *Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals*, *op. cit.*

[1750] Williams, O. H., & Rintoul-Hynes, N. L. J. (2022). *Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle*, *op. cit.*

[1751] Pennington, J. C., T. F. Jenkins, J. M. Brannon, J. Lynch, T. A. Ranney, T. E. Berry, Jr., C. A. Hayes, P. H. Miyares, M. E. Walsh, A. D. Hewitt, N. Perron, and J. J. Delfino (2001). *Distribution and fate of energetics on DoD Test and training ranges: Interim Report 1*. ERDC TR-01-13. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

[1752] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.2. Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA*.

[1753] Pennington, J. C., K. Poe, B. Silverblatt, C. A. Hayes, and S. A. Yost. (2006). E*xplosive residues from low-order detonations of artillery munitions, Chapter 9*, In *Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: Interim Report 6*. ERDC TR-06-12. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

En 2004 parut une autre étude diligentée par l'*U.S. Army Corps of Engineer* agrégeant l'état des connaissances sur les modalités d'introduction dans l'environnement de composés formant les munitions tirées et non explosées (UXO), parmi lesquelles (i) la corrosion (introduction différée), (ii) le pétardement (*Open Detonation, OD*)[1754] (introduction instantanée), sous le titre « *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? »* puis en 2004 toujours *« SERDP Final Technical Report - UXO Corrosion – Potential Contamination Source*[1755] *».* Cette étude fait réference. Jenkins et al (2006)[1756] entreprirent l'étude de 23 sites militaires d'entraînement aux Etats-Unis et au Canada avec comme objectif la caractérisation de la nature et de la distribution dans les sols de résidus de composés énergétiques, au regard des différentes typologies de munitions d'entraînement utilisées. Les composés visés par cette étude sont ceux présents dans les charges militaires propulsées et explosives (TNT, HMX.[1757], RDX.[1758]) ceux des propulseurs comme la nitrocellulose (NC), le 2,4-dinitrotoluène (DNT), la nitroglycérine (NG) et la nitroguanidine (NIGU).

Les chiffres annoncés par ces chercheurs dans ces publications (comme les taux de munitions déflagrées (détonation de bas-ordre), celles non explosées ou encore les taux d'imbrûlés, c'est-à-dire les fractions de chargements résiduels après fonctionnement ou dysfonctionnement des munitions, etc.) concernent les munitions modernes et ne peuvent être directement extrapolés aux projectiles de la Grande Guerre. L'Histoire démontre (cf. Section 1h), que les projectiles de 1914-1918 possédaient des chargements parfois de piètre qualité (impurs, faibles puissances de détonation, etc.), qui différaient, en composition et vitesses de détonation, de ceux des engins modernes. Toutefois, la conception et la technologie des munitions d'artillerie modernes diffèrent peu de celles utilisées durant la Première Guerre mondiale. Les travaux nord-américains publiés apportent par analogie un éclairage, unique, particulièrement instructif sur ce qu'auraient pu être les modalités d'introduction dans les sols de résidus d'explosifs de la Grande Guerre puis leur devenir environnemental.

Ces recherches mettent en lumière que tous les régimes de détonation sont à l'origine de dépôts de résidus d'explosifs sur les sols, consécutivement aux LOD ou aux HOD. Les études publiées dans les années 2000 aux USA montrent, durant la détonation, l'émission de particules d'explosifs imbrûlées.

Radtke et al. (2002)[1759] estime qu'il y a 19 900 particules de TNT de plus de 3 mm par yard cubique de sol (soit 0,76 m^3) au droit d'un site d'essais d'explosifs, pour une masse totale de 1,7 kg de TNT.

[1754] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations*? *op. cit.*

[1755] Parker, B. Chendorain, M., Lloyd, S. (2004). SERDP Final Technical Report - *UXO Corrosion – Potential Contamination Source*. April 2004.

[1756]Jenkins, T.F., Hewitt, A.D., Grant, C.L., Thiboutot, S. Pennington, J.C. (2006). *Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges. Chemosphere*, Volume 63, Issue 8, May 2006, Pages 1280-1290.

[1757] « Octogène », octahydro- 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine, explosif brisant apparu après la Première Guerre mondiale.

[1758] « Hexogène », cyclotrimethylenetrinitramine, explosif brisant apparu après la Première Guerre mondiale.

[1759] Radtke, C.W., Gianotto, D., Roberto, F.F., (2002). *Effects of particulate explosives on estimating contamination at a historical explosives testing area. Chemosphere 46*, 3–9.

Taylor et al., (2004)[1760] ont mesuré l'occurrence de résidus de détonation après le tir de huit obus d'un obusier 155 mm Howitzer, contenant 6,76 kg de TNT ; pour des détonations partielles (LOD) et totale (HOD), ils estiment respectivement entre 40 - 44% et 1-3% de la charge en TNT qui ne se serait pas décomposée et se serait déposée sous forme de particules sur les sols de surface. Localement des fragments macroscopiques de TNT ont été observés dans les deux cas / régimes de détonation. Walsch et al. (2013)[1761] démontrent que la détonation de haut-ordre et de bas-ordre de projectiles de mortier modernes de 60 mm, chargé en *Picatinny Arsenal Explosive 21* (PAX-21)[1762] produisent des résidus de nitrate d'ammonium, et libèrent dans les sols respectivement 15 et 38 % de la charge initiale en perchlorate d'ammonium (NH_4ClO_4) soluble. Des projections similaires ont été constatées au droit et aux abords des sites de destruction de munitions par pétardement (destruction d'UXO par éclatement sur le lieu de la découverte ou « *Blown-In-Place* » BIP). Ces modalités de fonctionnement ou de dysfonctionnement des munitions sont des vecteurs d'introduction directe, instantanée au moment de la détonation, d'une fraction des chargements sous forme particulaire dans l'environnement.

3.2.2 Taux de masses résiduelles en explosif consécutivement aux détonations de haut-ordre (*High-Order Detonation,* HOD)

Les fractions d'explosif résiduel (en % du chargement initial) s'avèrent d'une très grande variabilité dans le cas des détonations de haut-ordre, s'établissant dans une fourchette comprise entre 0,00001 % et 2% du chargement initial en TNT. Jenkins et al. (2002)[1763] identifient 4 430 µg.m^{-2} et 40 µg .m^{-2} déposés sur de la neige vierge après une détonation totale à haut-ordre d'un obus de mortier de 81 mm.

Ces études sur des munitions d'artillerie modernes montrent que la valeur de 0,001% de la charge explosive initiale constitue une valeur haute pour l'évaluation du taux de dispersion des imbrulés après détonation de haut-ordre (HOD). La granulométrie de ces particules d'imbrûlés est très fine, de l'ordre ou inférieure à 1 mm (cf. Figure 266 ci-contre). Le LfU dans son étude de référence sur les terrains de destruction de munitions post Seconde Guerre mondiale en Bavière (Schwendner (2009)[1764]) retient une valeur similaire, de 0,003%.

Figure 266 : Particules de TNT imbrulées collectées autour d'un point d'impact d'un projectile de 155 mm observées à la loupe binoculaire (tiré de Taylor et al., (2004)[1765]).

[1760] Taylor, S. Hewitt, A., Lever, J., Hayes, C., Perovich, L., Thorne, P. Daghlian, C. (2004). *TNT pArticle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds. Chemosphere* 55 (2004) 357–367.

[1761] M.R. Walsh et al (2013). *Perchlorate contamination from the detonation of insensitive high-explosive rounds. Journal of Hazardous Materials 262* (2013) 228–233

[1762] Formulation à base de DNAN. (34 % en poids (liant / stabilisant), de cyclotrimethylenetrinitramine (RDX: 35.75 %) et de perchlorate d'ammonium (AP).

[1763] Jenkins, T.F. et al. (2006). *Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges, op. cit.*

[1764] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

[1765] Taylor, S. Hewitt, A., Lever, J., Hayes, C., Perovich, L., Thorne, P. Daghlian, C. (2004). *TNT pArticle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds, op. cit.*

Le nombre de particules déposées sur le sol décroit en s'éloignant du point d'impact, mais leur taille augmente[1766].

Ainsi, un bombardement par 1 000 obus français de 75 mm de 7 kg[1767] renfermant de l'ordre de 500 g d'explosifs (*Mélinite*) chacun, laisserait sur la surface impactée après HOD, de l'ordre de 5 g de résidus d'explosifs (pour un taux d'imbrûlés de 0,001%), de l'ordre de 14 à 120 g pour des projectiles de 155 mm et de 300 à 600 g pour des calibres de 280 mm.

Si on part de l'hypothèse d'un impact par m^2, la superficie impactée serait de 1 000 m^2, et pour un brassage des sols sur 30 cm en moyenne, le tonnage de matériaux pédologiques brassés de 300 m^3, soit pour une densité de sol de 1,5 tonnes $.m^{-3}$, de 450 tonnes. Les teneurs moyennes en résidus d'explosifs seraient pour un bombardement au 75 mm, 155 mm et 280 mm uniquement, respectivement de 0,01 mg/kg, 0,26 mg/kg et 1,3 mg/kg. Les teneurs en résidus d'explosifs résultant des détonations de haut-ordre apparaissent faibles même pour une forte densité d'impact.

3.2.3 Taux de masses résiduelles en explosif consécutivement aux détonations de bas-ordre (*Low-Order Detonation*, LOD)

Les munitions tirées peuvent suivre un régime de déflagration. Ce régime de fonctionnement est aussi un de ceux suivis par les engins explosifs neutralisés par détonation « sympathique » lors des opérations de pétardement (*Open Detonation*). Aucune mesure n'a été réalisée visant la quantification des masses résiduelles d'explosifs au terme de détonations de bas-ordre sur les champs de tir actifs étudiés par l'ERDC, en partie du fait que ce régime de détonation est très peu fréquent et les opportunités d'échantillonner les sols autour des points d'impact extrêmement rares et aléatoires. Les chercheurs américains firent alors, en première approche et à défaut de mesures, le rapprochement avec les détonations de bas-ordre se produisant lorsque les munitions non explosées isolés (éparses) sont détruites intentionnellement par *Open-Detonation* sur les lieux de leur découverte, pour lesquelles des mesures de masses résiduelles d'explosifs ont pu être réalisées dans des conditions contrôlées. Le taux de 50% a été retenu pour quantifier la masse résiduelle après détonation de bas-ordre[1768]. Les dimensions des particules retenues dans les modèles de transfert environnementaux nord-américains sont typiquement inférieures à 100 mm[1769]. Le projectile ayant suivi un régime de détonation de bas-ordre est éventré ou fragmenté, en expulsant des fragments d'explosif. Les fragments générés par LOD de dimensions centimétrique à pluri-centimétrique sont désignés par *chunks* (littéralement « *gros morceau* »), ceux de taille infra-centimétriques *flakes* (littéralement « flocons ») (cf. Figure 267). Les limites de taille entre les deux catégories de fragments ne sont pas clairement définies. Pour le LfU (2009) « *il paraît raisonnable de parler de « blocs » lorsque les résidus sont identifiables à l'oeil nu*[1770] ».

[1766] Taylor S., J. Lever, L. Perovich, E. Campbell, and J. Pennington (2004b). *A study of Composition B pArticle from 81-mm mortar detonations*. Sustainable Range Management Conference.

[1767] Bélot, H. Communication personnelle.

[1768] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations*? *op. cit.*

[1769] *Ibid.*

[1770] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

Figure 267 : A gauche, fragments grossiers centimétriques (chunks) de TNT récoltés à la surface du sol sur une surface de 10 x 10 m sur un site de destruction de munitions par éclatement (pétardement avec détonations de bas-ordre, à Fort Bliss, Nouveau Mexique, USA). A droite, particules millimétriques de TNT (flakes) issus de sols d'un terrain de pétardement[1771].

L'explosif est parfois apparent, encore adhérent aux restes métalliques du corps des projectiles. Généralement, sont conservées les parties les plus solides des projectiles à savoir le culot et la partie ogivale (cf. Figure 268). Dans le cas des UXO, un temps est nécessaire pour que s'opèrent des processus de corrosion qui, par l'érosion physico-chimique voire microbiologique des enveloppes métalliques des corps des engins, mettent au contact le chargement avec l'environnement dans lequel ces objets se sont fichés. La mobilisation de ces composés vers l'environnement est ainsi différée. Ces processus d'introduction instantanée et différée sont exposés et discutés dans ce qui suit.

[1771] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

Figure 268 : Fragments de munitions d'engins partiellement détonés (détonation de bas-ordre) observés au droit des anciens champs de bataille de la Première Guerre mondiale. a) et b) Projectile d'artillerie lourde disloqué montrant des fragments d'explosifs (brun) autour du projectile et des restes de chargement encore adhérents au culot (Thélus, Pas-de-Calais), c) et d) Culots de projectiles explosifs (de rupture) montrant la persistance de restes d'explosif encore adhérents (Juvincourt, Aisne), e) Obus à balles partiellement détoné exposant son reste de chargement de balles en Pb/Sb (Thélus, Pas-de-Calais)[1772].

[1772] Collection particulière, Cardem-Pyro. Communication personnelle.

3.2.4 Devenir des métaux et métalloïdes formant les fusées d'artillerie et les enveloppes des projectiles

Les enveloppes métalliques, formant plus de 4/5e de la masse totale des projectiles, sont totalement ou partiellement lacérées, au moment de leur détonation totale ou partielle, en une multitude d'éclats de toute taille dont les matières constitutives ne sont nullement décomposées, mais se mêlent aux matériaux formant les sols au point d'impact. Il en est de même des fusées d'artillerie mais aussi des balles en alliage plomb / antimoine (Pb/Sb) des obus à balles et mitraille (*Shrapnels*). L'observation fine des sols intensément bombardés comme à Douaumont, sur le champ de bataille de Verdun (cf. Figure 269) montrent l'occurrence, mêlés à des roches calcaires oxfordiennes finement broyées prises dans une matrice terreuse, de très nombreux éclats centimétriques et esquilles métalliques millimétriques, résultant de la fine fragmentation des très nombreux obus détonés sur cette zone. Les teneurs des sols en métaux générées par ces fragments métalliques (principalement fer (Fe), manganèse (Mn) des *casings,* et en moindre mesure plomb (Pb), antimoine (Sb) des balles de *Shrapnel*, cuivre (Cu), zinc (Zn) des ceintures de guidage et fusées d'artillerie) sont d'autant plus élevées que la densité journalière des tirs fut élevée (nombre d'impacts par $m^2.jour^{-1}$). Plus les tirs sont concentrés, plus la densité des impacts est élevée, plus la masse de résidus d'explosifs et de métaux par unité de surface et de volume est élevée, plus les teneurs moyennes sont importantes.

Les études des distributions des teneurs en métaux et métalloïdes dans les sols de surface au droit de certains secteurs bien circonscrits (de quelques centaines à milliers de km^2) des anciens champs de bataille de la Première Guerre mondiale (Van Merveinne et al., (2008[1773]). Meerschman et al., (2011) [1774], Williams et al., (2022)[1775]) constituent les seules actions de recherche entreprises visant spécifiquement l'évaluation des conséquences environnementales actuelles de la Grande Guerre. Aucune publication n'a été identifiée portant sur la distribution dans ces sols des résidus d'explosifs. Les principales conclusions de ces études sont qu'il n'existe pas sur les secteurs d'étude de pollution des sols généralisée mais que localement peuvent apparaître des anomalies en plomb et cuivre en relation avec les particules métalliques introduites dans les sols lors des combats de la Grande Guerre. Les teneurs anomaliques sont faibles et proches du fond géochimique local. La distribution discrète des fragments métalliques générés par les impacts est à l'origine des effets pépite observés lors de l'échantillonnage et l'analyse de ces sols, notamment dans le cadre de ces études.

Les quantités de métaux susceptibles d'avoir été introduites dans les sols peuvent s'avérer considérables. Ainsi, un bombardement par 1 000 obus français de 75 mm de 7 kg[1776] libèrerait 7 * 1 000 kg en métaux, soit 7 tonnes.

Les données chiffrées publiées concernant la densité des impacts sont généralement rapportées à la superficie des champs de bataille bombardée, ce qui n'a guère de sens car l'intensité des pilonnages varia dans le temps et l'espace durant les affrontements. La connaissance de la densité des tirs à l'échelle locale (et non à celle souvent publiée des champs de bataille) est essentielle pour évaluer les conséquences environnementales des bombardements, mais malheureusement cette donnée est non documentée au regard des études et archives consultées dans le cadre de cette recherche.

[1773] Van Meirvenne, M., T. Meklit, S. Verstraete, M. De Boever, F. Tack. (2008). *Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres? op. cit.*

[1774] Meerschman, E., Cockx, L., Monirul Islam, M., Meeuws, F., Van Meirvenne, M. (2011). *Geostatistical Assessment of the Impact of World War I on the Spatial Occurrence of Soil Heavy Metals*, *op. cit.*

[1775] Williams, O. H., & Rintoul-Hynes, N. L. J. (2022). *Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle*, *op. cit.*

[1776] Bélot, H. Communication personnelle.

Figure 269 : Cailloutis de calcaire corallien oxfordien finement fragmentés mêlé à une forte densité d'éclats et esquilles métalliques sur un secteur intensément bombardé du Ravin du Helly, Douaumont, champ de bataille de Verdun (département de la Meuse)[1777].

3.2.5 Déconfinement différé dans les sols des composés d'origine pyrotechnique. Les UXOs et les effets de la corrosion

Introduction générale

Les UXOs sont les munitions tirées non explosées à l'impact (conséquence des incidents de tir), gisant à la surface, ou ayant pénétré les sols à profondeurs variables, pour lesquelles les chargements explosifs sont enfermés et isolés du milieu extérieur par l'enveloppe métallique des engins (en acier bas-carbone, en acier, fonte ou fonte aciérée (FA)). Au contact de l'humidité du sol, de l'oxygène de l'air et des conditions environnementales, cette enveloppe se corrode lentement.

La corrosion désigne l'ensemble des processus physico-chimiques et électrochimiques conduisant à la dégradation puis à la désagrégation des matériaux métalliques. Cette détérioration est provoquée par une réaction chimique des métaux avec leur environnement, correspondant à une oxydation (réaction avec un oxydant, majoritairement O_2 et le cation H^+). La corrosion est le mécanisme susceptible d'altérer et de rompre l'intégrité physique des enveloppes métalliques des projectiles et d'exposer leur chargement aux eaux météoriques (ou aux eaux de surface, aux eaux marines) au contact desquelles les fractions solubles de ce chargement peuvent être mobilisées vers l'environnement et ainsi polluer les eaux ou encore se volatiliser vers l'atmosphère (pour certains agents toxiques de guerre).

[1777] Hubé, D. (2013).

Les mécanismes de corrosion possèdent leur propres cinétiques dépendantes (i) de la nature et de la qualité des métaux altérés, (ii) des conditions physico-chimiques et microbiologiques qui prévalent dans l'environnement hôte des UXOs. Le processus de corrosion est accéléré par l'exposition à la température chaude, aux acides et aux sels. Le temps nécessaire à la perte de tout ou partie de l'intégrité des enveloppes métalliques des munitions est directement dépendant de cette cinétique et de l'épaisseur des parois des engins de guerre.

Un phénomène d'altération physico-chimique en trois phases

La corrosion des enveloppes des munitions est un phénomène complexe impliquant des mécanismes physiques, électrochimiques et chimiques mais aussi microbiologiques. Il existe peu d'études portant sur les vitesses et les modalités de corrosion des munitions non éclatées abandonnées sur ou dans les sols, paramètres pourtant déterminant des cinétiques de libération potentielle de la charge contenue (le chargement) vers l'environnement. La corrosion de certaines enveloppes métalliques est constatée lors de découvertes des munitions enfouies ou ennoyées. Des chercheurs français et étrangers se sont intéressés au vieillissement par corrosion des objets métalliques enfouis dans le sol, essentiellement pour des applications dans le domaine de l'archéologie et de la protection des canalisations en fonte. Des études et investigations ont été menées sur le rôle joué par la corrosion dans le potentiel d'émissions de substances chimiques formant les munitions non explosées (UXOs), études notamment motivées par les évaluations environnementales des grands sites de coulage marin (Allemands, Russes, Américains[1778] après la Seconde Guerre Mondiale) en mer du Nord[1779] et mer Baltique[1780]. Des études ont été menées aux USA par l'*US Corps of Engineers* (*Department of Defence Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP)) afin d'évaluer les impacts environnementaux des UXOs dans les sols et les eaux souterraines au droit des champs de tir actifs en Amérique du Nord[1781].

Les résultats de ces recherches sont synthétisés et exposés dans ce qui suit. Un engin aux parois métalliques intègres introduit dans le sol va vieillir suivant trois phases.

Figure 270 : Ogive d'une munition britannique montrant l'action de la corrosion avec écaillage du marquage signalétique (La Boisselle, département de la Somme)[1782].

La première phase, qui s'étend de quelques mois à quelques années, voit la perte des peintures distinctives et des vernis (lorsque la munition en est dotée) (cf. Figure 270, ci-contre), suivie de l'apparition d'une couche de rouille superficielle sur l'ensemble de l'objet.

[1778] Silva, J., Chock, T. (2016). *Munitions integrity and corrosion features observed during the HUMMA deep-sea munitions disposal site investigations*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. Volume 128, June 2016, Pages 14-24.

[1779] Den Otter, J.H., Pröfrock, D., Bünning, T.H., Strehse, J.S., Van der Heijden, A. E. D. M. and E. Maser, E. (2023). *Release of Ammunition-Related Compounds from a Dutch Marine Dump Site. Toxics.* 2023 Mar; 11(3): 238.

[1780] Jurczak, W., Fabisiak, J. (2017). *Corrosion of ammunition dumped in the Baltic Sea. Journal of KONBiN*.

[1781] Taylor, S. Lever, J. Walsh, M. Walsh, M.E. Bostick, B. Packer, B. (2004). *Underground U.X.O: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations ? op. cit.*

[1782] Hubé, D. (2017).

La corrosion ne concerne pas uniquement la surface externe des corps de projectiles (extrados) mais elle affecte aussi la partie interne (intrados), lorsque l'acier est au contact de l'explosif (renfermant des sels) ou de certains liquides (toxiques, incendiaires, etc.) agressifs.

La rouille est un mélange complexe d'oxydes et d'hydroxydes de fer oxydé (Fe^{3+}). La formation de la rouille débute par celle d'hydroxyde de fer ferreux (Fe^{2+}) [$Fe(OH)_2$], suivie par l'oxydation des ions ferreux en hydroxyde de fer ferrique (Fe^{3+}) sous l'action de O_2 de l'air puis par l'hydratation des hydroxydes de fer ferriques.

Dans la seconde phase, la corrosion devient active, avec une perte de matière et la mise en place d'un « cocon » de rouille. La corrosion progresse d'environ 0,03 millimètre par an durant environ un siècle. La couche de rouille créée va en quelque sorte venir protéger le métal, l'isoler de l'oxygène (effet de passivation) et sensiblement ralentir la corrosion en profondeur qui se poursuit, durant la troisième phase, sous la rouille, à hauteur de 0,01 millimètre par an.

La perte de matière s'opère fréquemment via l'érosion corrosive par plaques catastrophiques sur la paroi des engins (cf. Figure 272). Ce schéma théorique s'applique aux munitions monoblocs enfouies dans des sols homogènes et non perturbés par l'activité humaine. Les sels (comme le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), NaCl, chlorates (ClO_3^-) et perchlorates (ClO_4^-)) contenus dans les explosifs, dès lors qu'ils sont mis au contact de l'humidité du sol par la disparition d'une partie de l'enveloppe métallique, peuvent accélérer le processus de corrosion[1783] interne et/ou externe. La corrosion s'attaque aussi préférentiellement par effet galvanique aux jointures entre des éléments métalliques de composition différente, vissés ou emboîtés, comme à l'œil des obus (au contact avec la fusée). Certaines munitions chimiques anciennes, possédant un réservoir en plomb calé par un ciment à l'oxychlorure de magnésium, sont très sensibles à la corrosion. Ces assemblages favorisent la corrosion électrolytique par bimétallisme (cf. Figure 271 et Figure 272 page suivante).

[1783] Bohn, M.A. (2007). *Wenn Explosivstoff älter wird – wird er auch empfindlicher ? Kampfmittelbeseitigung und der Faktor Zeit- Untersuchungen zu Veränderung in der Empfindlichkeit*.

Obus explosif de 75 mm perforé par la corrosion, montrant la formation d'oxydes de cuivre instables et sensibles aux chocs et à la friction (WWII).

Munitions de 20 mm de canons aéroportés montrant une forte corrosion du détonateur en aluminium.

Figure 271 : Aperçu photographique de munitions corrodées de la Seconde Guerre mondiale[1784].

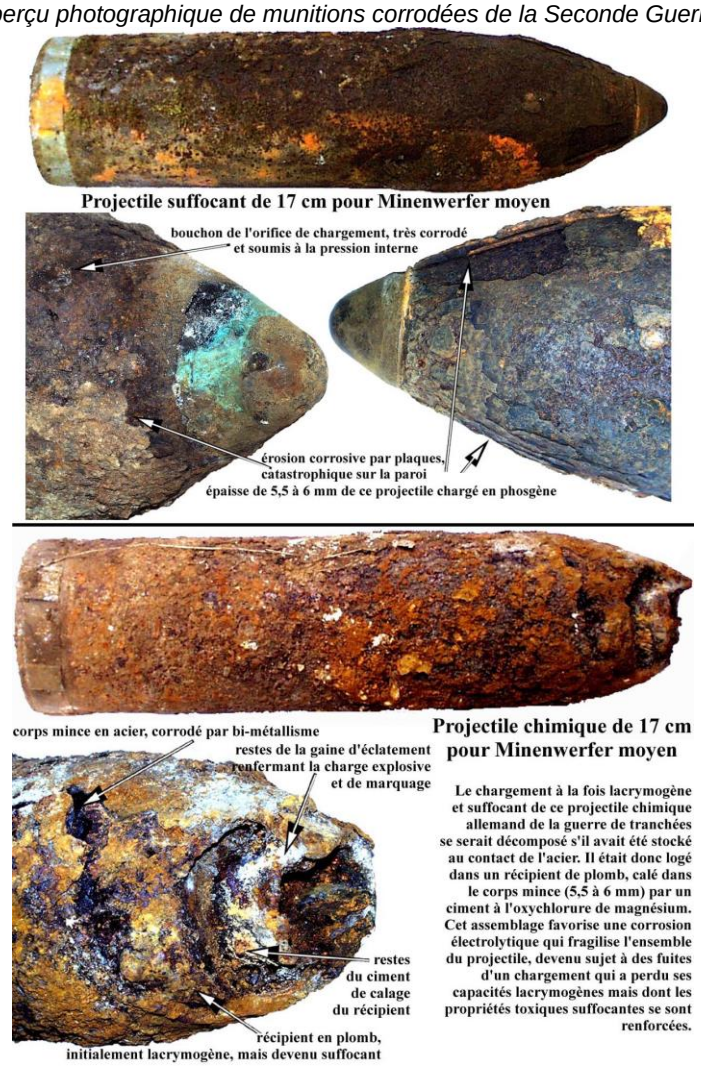


Figure 272 : Exemples d'effets de la corrosion accélérée par bimétallisme (corrosion électrolytique) sur des projectiles chimiques allemands de la Première Guerre mondiale[1785].

[1784] Extrait de Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen.Praxisteil*, *op. cit.*

[1785] Collection particulière, Bélot, H. Communication personnelle.

Phénomènes en jeu et modèles de corrosion

Les données actuelles montrent que la cinétique de corrosion est essentiellement contrôlée par la résistance mécanique du sol, le pH, le potentiel redox et la teneur en fer et en carbonate des sols hôtes des munitions. Une étude a mis en évidence que, pour des munitions ennoyées en mer, la vitesse du courant au contact des munitions constitue un facteur déterminant des cinétiques de corrosion[1786]. D'autres études montrent que les phénomènes sont plus complexes, et dépendent des types d'alliages et de leur état ainsi que de facteurs physico-chimiques externes combinés ; cette complexité conduit sur un même site à des vitesses de corrosion qui peuvent différer, pour un même type, d'une munition à l'autre.

Le centre de recherche pour l'environnement du Département de la Défense des USA (ERDC) a publié en 2004 les résultats de plusieurs études portant sur le diagnostic et la modélisation des vitesses et modalités de corrosion d'enveloppes de munitions non explosées[1787]. Une première étude[1788] a mis en évidence, sur de très nombreux sites, que les durées de perforation des munitions varient de 10 ans à plusieurs milliers d'années selon les conditions physico-chimiques spécifiques des sites. Le modèle de corrosion distingue (i) la corrosion générale de l'enveloppe d'une part, (ii) de la perforation locale de l'épaisseur de l'enveloppe d'autre part. Le modèle se base sur l'oxydation de Fe° (réaction anodique) et la réduction de l'oxygène gazeux O_2 (réaction cathodique). Selon :

$$2Fe° = 2\ Fe^{2+} + 4é \text{ (réaction anodique) (1) et}$$
$$O_2 + 4é + 4\ H^+ = 2\ H_2O \text{ (réaction cathodique) (2)}$$

La perforation débute lorsque l'oxygène à la surface de la munition génère une demande électrochimique en électrons selon l'équation (2). Lorsque la perforation s'élargit, les oxydes et hydroxydes de fer se forment, précipitent et s'accumulent. La présence de carbonate et de calcium dans les sols crée un potentiel de précipitation de carbonate de fer et de calcium. Ces précipitas forment un bouchon sur la perforation qui réduit drastiquement la diffusion des ions dans et hors de la perforation. Ainsi, dans les conditions habituellement rencontrées dans les sols, il se forme autour de l'enveloppe des munitions une couche d'oxyhydroxydes de fer et de carbonates qui passive les effets de corrosion[1789].

La corrosion perforante domine la corrosion générale au début du processus, et les deux phénomènes se déroulent simultanément. Lorsque la passivation par les précipitas carbonatés et d'oxyhydroxydes de fer apparaît, la corrosion générale commence à impacter directement la cinétique de corrosion de la munition.

L'étude de Parker, B. et al., (2004) a couplé la modélisation aux mesures de terrain (physiques, chimiques, microbiologiques, météorologiques, pédologiques) sur 161 munitions et sols environnants, munitions couvrant un grand intervalle de temps, de la Guerre de Sécession jusqu'à des munitions déposées dans les années 90.

[1786] Silva, J.A.K., Taylor, C. (2016). *Munitions integrity and corrosion features observed during the HUMMA deep-sea munitions disposal site investigation. Deep-Sea Research II 128* (2016) 14-24.

[1787] Parker, B. (2004). *UXO Corrosion – Potential Contamination Source*. SERDP Project ER-1226. U.S. Army Environmental Command Praxis Environmental Technologies, Inc.

[1788] Defense Science Board. *Report on Corrosion Control*. October 2004. Office of the Under Secretary of Defence. For Acquisition, Technology, and Logistics. Washington, DC. 20301-3140.

[1789] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

Les mesures montrent certaines corrélations entre la profondeur des perforations et les conditions climatologiques locales :

- Les profondeurs moyennes maximales de perforation des échantillons prélevés dans des conditions pluviométriques de moins de 500 mm / an sont de 560 ± 120 µm.

- Pour les échantillons issus de sites soumis à une pluviométrie de plus de 500 mm / an les profondeurs maximales moyennes de perforation sont de 970 ± 90 µm.

Les profondeurs maximales de perforation sont bien supérieures pour les échantillons collectés sur des sites non arides que pour ceux provenant de sites arides. Ce résultat montre l'importance de la pluviométrie et de la teneur en eau des sols hôtes des munitions dans les cinétiques de corrosion.

Les effets de la corrosion sont bien plus prononcés sur les fragments de munitions explosées ou les engins partiellement détonées (LOD). Sur les 161 échantillons analysés, seulement trois munitions apparaissent fissurées ou partiellement détonées. Défauts, déformations et fissures pouvant apparaître dans les enveloppes métalliques des munitions détonées en bas-ordre constituent des points de fragilité au niveau desquels les phénomènes de corrosion peuvent s'accélérer. Les engins ayant suivi un régime de LOD libèrent des composés énergétiques dans les sols et l'environnement parallèlement à la corrosion locale et générale.

Une autre conclusion importante de cette étude est la polarisation de la corrosion : celle-ci progresse depuis l'ogive des munitions vers leurs bases. Les résultats tendraient à prouver que les munitions enterrées se corrodent plus rapidement à leur base (culot), vraisemblablement en relation avec des forces matricielles au contact entre sol et munition. L'eau s'accumule à la base de la munition à l'exception des sols à fortes pressions hydrostatiques (sols hygromorphes sous régime de fortes pluviométries).

Cinétiques de corrosion. Le temps qui ronge.

Dans l'étude de Taylor et al., (2004)[1790], l'épaisseur des munitions considérées varie de 0,076 à 6,4 cm. Aucun échantillon n'a révélé de profondeur de perforation supérieure à 0,25 cm, signifiant qu'en 150 ans, la corrosion pénètre les enveloppes des munitions sur moins de 0,25 cm dans les conditions de ce site (et en particulier des conditions d'humidité des sols). A partir d'une certaine épaisseur des parois des munitions, la perforation de l'enveloppe paraît improbable. Des modélisations donnent des cinétiques de corrosion de 0,07 à 0,08 $mm.an^{-1}$ soit une durée de vie moyenne des enveloppes des munitions de 200 à 450 ans[1791]. Ces valeurs convergent avec celles mesurées in-situ sur le terrain. Les cinétiques de corrosion des parois des projectiles en acier bas-carbone s'établissent entre 0,02–0,1 $mm.an^{-1}$ (avec une moyenne de 0,025 $mm.an^{-1}$) dans des sols aérés en conditions aérobies[1792].

[1790] Taylor, S. Lever, J. Walsh, M. Walsh, M.E. Bostick, B. Packer, B. (2004). *Underground U.X.O: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations ? op. cit.*

[1791] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit*.

[1792] Penhale, H.R. (1971). *Corrosion of mild steel plates in some New-Zealand soils, New Zealand Journal of Science,* 14(2): 336–337 / Levlin, E. (1996). *Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: In situ monitoring cell current and potential. Corrosion Science,* 38(12): 2083–2090 / Norin, M., and T.G. Vinka (2003). *Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment. Materials and Corrosion*—Werkstoffe Und Korrosion, 54(9): 641–651.

Ces vitesses de corrosion s'accélèrent dans des environnements anaérobies sulfato-réducteurs, où elles peuvent excéder 1 mm.an^{-1}[1793].

Ces valeurs de cinétiques mesurées par expérimentation convergent avec celles obtenues par simulation par le modèle de corrosion des UXOs de Garber et Adams[1794]. Ainsi il paraît raisonnable, compte tenu des facteurs d'incertitudes, d'estimer des vitesses de corrosion inférieures à 0,1 mm.an^{-1}, avec une variabilité des cinétiques dépendante des conditions physico-chimiques locales des sols hôtes, elles-mêmes en partie dépendantes des conditions météorologiques locales. Les cinétiques de corrosion de l'acier dans une large variété de sols ne semble varier que de facteurs 2 à 5[1795].

Le temps nécessaire à la perforation des parois métalliques et plus généralement à la perte de l'intégrité des engins de guerre enfouis est dépendant (i) des cinétiques de corrosion directement liées à des facteurs environnementaux, (ii) des épaisseurs des parois des engins et (iii) de l'existence de points de fragilité comme les fissures, déformations (comme pour les munitions ayant suivi un régime de bas-ordre), d'alliages sensibles à la corrosion ou encore de jointures entre des métaux et alliages de différente nature. Ainsi, certains environnements sont propices à la corrosion, comme les sols hygrométriques (saturés en eau), où prévalent les conditions dites « anaérobies sulfato réductrices » qu'affectionnent certaines bactéries contribuant à la corrosion.

En conditions anaérobies, l'oxygène du milieu est consommé par l'oxydation de la matière organique, et ensuite ce sont les autres accepteurs d'électrons dont le sulfate (conditions sulfato-réductrices) qui sont consommés. De plus, l'oxydation de la matière organique produit du CO_2 qui acidifie le milieu. Cette diminution du pH favorise la corrosion. La corrosion peut par ailleurs produire de l'hydrogène H_2 que les bactéries sulfato-réductrices oxydent, en produisant de l'H_2S qui est lui-même corrosif (formation de H_2SO_4 au contact de H_2O)

Les sols perméables à l'air et les sols humides, renfermant des électrolytes, sont plus particulièrement favorables à la corrosion[1796]. Durant la Première Guerre mondiale, les fusées d'artillerie allemandes, initialement en laiton, furent substituées (pour limiter la consommation en métaux stratégiques non-ferreux) par celles en alliage Zn / (Cd) / Cu[1797] et en aluminium (Al). Ces alliages sont sensibles à la corrosion, en particulier lorsqu'ils ont été mis au contact d'éléments de fusées en acier (corrosion électrochimique bimétallique).

[1793] Hamilton, W.A. (1983). *The role of sulfate-reducing bacteria in anaerobic corrosion. Journal of Applied Bacteriology,* 55(3): R3–R3 / Hamilton, W.A. (1985). *Sulfate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. Annual Review of Microbiology*, 39: 195–217 / Hamilton, W.A. (1998). *Bioenergetics of sulphate-reducing bacteria in relation to their environmental impact. Biodegradation*, 9(3–4): 201–212 / Hamilton, W.A. (2003). *Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: A unifying electron transfer hypothesis. Biofouling*, 19(1): 65–76 / Schutt, H.U., and P.R. Rhodes (1996). *Corrosion in an aqueous hydrogen sulfide, ammonia, and oxygen system. Corrosion*, 52(12): 947–952 / Kajiyama, F., and K. Okamura (1999). *Evaluating cathodic protection reliability on steel pipe in microbially active soils. Corrosion*, 55(1): 74–80 / Videla, H.A. (2000). *An overview of mechanisms by which sulphate-reducing bacteria influence corrosion of steel in marine environments. Biofouling*, 15(1–3): 37–47 / Li, S.Y., Y.G. Kim, K.S. Jeon, Y.T. Kho, and T. Kang (2001). *Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. Corrosion*, 57(9): 815–828.

[1794] Décrit dans Fabian, G.L., and S. Ostazeski (2002). *Corrosion of unexploded ordnance (final report).* U.S. Army Environmental Center Report SFIM-AEC-PC-CR-2002041.

[1795] Taylor, S. Lever, J. Walsh, M. Walsh, M.E. Bostick, B. Packer, B. (2004). *Underground U.X.O: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations ? op. cit.*

[1796] Ostazeski, S., Saubier, L.F. (2002). *Corrosion of Buried Mines*. U.S. Army Aberdeen Test Center.U.S. Army Environmental Center.

[1797] Le cadmium (Cd) est, comme l'indium (In), une impureté du zinc (Zn) dont les % dans ce métal reflètent la composition du minerai (blende ou sphalérite, ZnS).

Les sols siliceux, à pH acide, comme sur la Gaize d'Argonne ou les formations métamorphiques et granitiques siliceuses des Vosges favorisent la corrosion.

Les grenades à manche allemandes de la Première Guerre mondiale, découvertes à la surface du sol dans le cadre de la présente recherche, présentaient ainsi de nombreuses lumières dans les fines parois de l'enveloppe renfermant la charge explosive (cf. photographie de la Figure 273 ci-contre).

Figure 273 : Grenades à manche allemandes découvertes à Vauquois, montrant des parois en acier fines profondément corrodées[1798].

En milieu marin la corrosion (favorisée par la forte minéralisation de l'eau en ions chlorure et sodium) est ralentie aux grandes profondeurs du fait des faibles températures et de la faible concentration en oxygène dissous. Des plongées d'inspection sur le site de Skagerrak au large de la Norvège (entre le Danemark et la Norvège) en 1989 montrent que certaines munitions étaient intactes, alors que d'autres étaient corrodées, et vidées de leur contenu[1799].

Ordres de grandeur des durées nécessaires à la perte de l'intégrité des parois des UXO de la Grande Guerre

Les munitions les plus exposées à la perte de leur intégrité sont celles dont les parois sont les plus fines. Il s'agit en particulier des grenades, projectiles d'artillerie de tranchées ou encore les projectiles à chargement chimique. Les obus d'artillerie lourde sont mieux conservés que les bombes aéroportées, compte tenu des différences notables d'épaisseur d'acier entre les deux munitions. Dans le Tableau 36, des données relatives aux épaisseurs de parois d'obus d'artillerie de campagne de la Première Guerre mondiale ont été collectées, puis, considérant les vitesses théoriques moyennes de corrosion identifiée dans la littérature scientifique publiée pour des aciers bas-carbone, le temps théorique nécessaire à la perforation des projectiles (et donc à l'éventuelle libération du contenu par dissolution) a été calculé, dans des conditions toutes égales par ailleurs. Cette approche suivant une logique linéaire entre le temps et la durée nécessaire à la perforation des *casings* considérant une cinétique de corrosion constante est simpliste. Elle a été retenue faute d'autres apports issus de la recherche sur ce sujet. Les temps de perforation théoriques convergent toutefois avec les conclusions de l'expertise des professionnels du déminage « *Sans qu'il soit utile de pousser la démonstration beaucoup plus loin, il peut être affirmé que si certains engins de guerre ont d'ores et déjà perdu leur intégrité, d'autres vont être en capacité de la conserver encore plusieurs siècles*[1800] ».

[1798] Hubé, D. (2019).
[1799] Tørnes, J. A., Øyvind, V., Ljønes, A., Opstad, M., Aase M, Bjerkeseth L. H., Hussain, F. (2002). *Investigation and risk assessment of ships loaded with chemical ammunition scuttled in Skagerrak* TA-1907/2002.
[1800] Schnell, E. (2014). *Vieillissement des munitions chimiques de la Première Guerre mondiale en France. Etat des lieux et analyse des risques. Propositions pour une meilleure prévention des accidents*. ENSCM.

Désignation	Calibre (mm)	Longueur (sans fusée) (mm)	Epaisseur de l'enveloppe (mm)	Temps de perforation (ans) (corrosion à 0,025 mm.an^{-1})	Poids explosif (kg)
Obus ordinaire 37 mm	37	85	5	200	0,025
Obus explosif 37 mm sprggr.	37	83	5	200	0,04
Obus ordinaire de 50 mm	50	147	6	240	0,085
Obus explosif de 60 mm à amorçage de tête	60	174	12	480	0,13
Obus explosif de 76,2 mm	76,2	224	15	600	0,39
Obus explosif 77 mm modèle 1896	77	254	14,5	580	0,22
Obus universel de 77 mm modèle 1911 (Geschoss 11)	77	244	4,75	190	0,25
Obus explosif de 77 mm modèle 1914	77	240	21	840	0,18
Obus explosif de 77 mm modèle 1915	77	243	15	600	0,38
Obus explosif de 77 mm allongé	77	312	10	400	0,9
Obus explosif de 77 mm allongé	77	312	10	400	0,63
Obus explosif de 77 mm allongé	77	312	10	400	0,895
Obus explosif de semi rupture de 77 mm	77	266	14,5	580	0,23
Obus explosif de 90 mm modèle 1882	90	225	21	840	0,22
Obus explosif de 90 mm modèle 1888	90	194	18	720	0,165
Obus explosif de 90 mm modèle 1914	90	194	18	720	0,25
Obus explosif de 90 mm modèle 1914 A	90	194	20	800	0,3
Obus explosif de 88 mm de calibre 2,8 (à fusée interne)	88	264	18	720	0,36
Obus explosif de 88 mm de calibre 3,7 (à fusée double effet)	88	282	17,5	700	0,512

Tableau 36 : Temps théoriques de perforation par corrosion de quelques projectiles d'artillerie de campagne utilisés pendant la Première Guerre mondiale (pour une vitesse moyenne de corrosion de 0,025 mm.an^{-1})[1801].

[1801] Données techniques concernant les projectiles. Bélot, H. Communication personnelle.

3.3. MOBILISATION DES COMPOSES DES MATIERES ENERGETIQUES VERS L'ENVIRONNEMENT PAR DISSOLUTION

Une fois déconfinés et mis au contact des sols, les chargements généralement solides des engins de guerre sont exposés à des processus naturels et en premier chef, celui de la dissolution au contact des eaux qui jouent tel un solvant. Les fractions solubles des fragments d'explosif se dissolvent alors au contact des eaux. Le premier mécanisme contribuant à la dissolution est celui, *per descensum*, par les eaux météoriques infiltrées (pluie efficace) dans nos régions tempérées arrosées par les précipitations. Les résidus solides des chargements sont alors soumis à un flux dynamique, discontinu d'eaux météoriques qui, dégradées, poursuivent ensuite gravitairement, *per descensum,* leur infiltration jusqu'à venir alimenter les eaux souterraines. Les eaux souterraines peuvent aussi en fluctuant saisonnièrement venir mobiliser *per ascensum* les résidus présents dans la zone non saturée. La dissolution est le principal mécanisme à l'origine de l'émission de substances d'origine pyrotechnique vers et au sein de l'environnement et en particulier les sols et les eaux. La volatilisation ne joue qu'un rôle très subordonné, la très grande majorité des poudres et explosifs ne présentant pas un caractère volatil.

Les phénomènes de dissolution des matières énergétiques (particulaires) introduites dans les sols contrôlent (i) les flux massiques (en $gr.an^{-1}$) en substances vers les eaux souterraines, (ii) les pertes de masse des particules en fonction du temps et *in fine,* (iii) les temps de résidence des particules dans les sols.

La solubilité est la capacité d'une substance (encore désignée soluté), à se dissoudre dans une autre substance, appelée solvant (généralement l'eau), pour former un mélange homogène appelé solution. La dissolution désigne ce processus. En thermodynamique, la solubilité massique est une grandeur physique notée « s » désignant la concentration massique maximale du soluté dans le solvant, à une température donnée. La solution ainsi obtenue est alors saturée. Les composés chimiques formant les poudres et explosifs possèdent, à l'état pur, des solubilités spécifiques généralement faibles (< 1 $g.L^{-1}$), à l'exception de l'acide picrique (14 $g.L^{-1}$ à 20 °C), et des sels (nitrates, ammonium, chlorates et perchlorates (jusqu'à 1 000 $g.L^{-1}$).

Mais les poudres et explosifs ne forment pas des corps simples mais des mélanges de différents composés chimiques. Par ailleurs, ces composés chimiques sont associés à des adjuvants comme les stabilisants qui peuvent modifier drastiquement la solubilité des composés purs pris séparément. La dissolution entraîne un appauvrissement progressif des résidus en fractions solubles (vieillissement des particules) et en corollaire leur enrichissement en fractions insolubles ou de moindre solubilité (cf. Figure 274). Ces pertes de masse se traduisent par une diminution de la taille des particules mais aussi par leur désagrégation progressive. La perte de masse en fonction du temps définit la cinétique de dissolution.

Les cinétiques de dissolution des explosifs diffèrent de celles des corps purs pris séparément.

Les cinétiques de dissolution sont quantifiées par des expérimentations au laboratoire lorsque les explosifs sont disponibles et leur composition connue. Ces expérimentations permettent d'acquérir les données d'entrée de modèle de dissolution tenant compte des mécanismes de diffusion (déplacement des molécules selon les gradients de concentration) et de convection (déplacement des molécules sous l'effet d'un gradient de pression / charge).

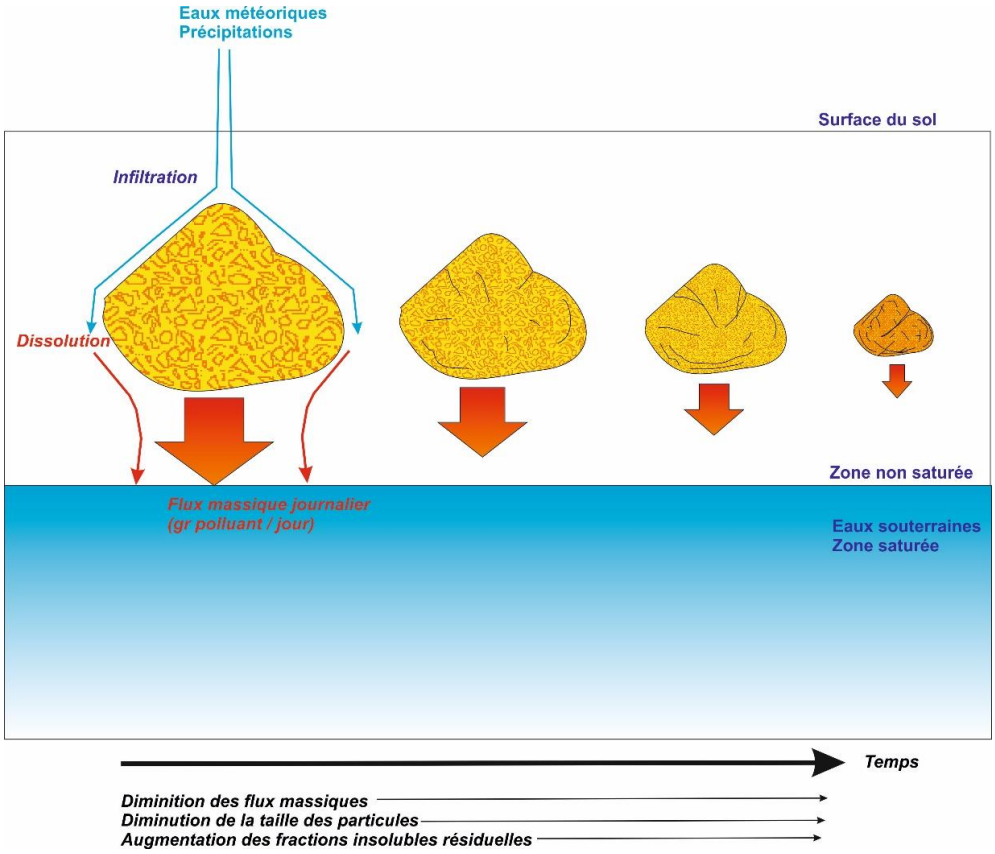


Figure 274 : Evolution des particules résiduelles dans les sols sous l'effet de la dissolution.

Des recherches ont été menées aux USA sur des explosifs modernes en dotation dans l'Armée américaine (*Composition B* (mélange standard de 59,5 % de RDX (vitesse de détonation 8750 m.s^{-1}), 39,5 % de TNT (vitesse de détonation 6 900 m/s) et 1 % de cire de paraffine pour améliorer sa manutention (agent stabilisant)), TNT, RDX), pour estimer les cinétiques de dissolution. Il n'existe pas de protocoles expérimentaux standards et uniformisés pour quantifier cette cinétique ce qui se traduit par une grande variabilité des valeurs obtenues. Les valeurs obtenues expérimentalement et les conditions expérimentales sont exposées dans le Tableau 37 page suivante.

Source et méthode	Matyskiela (2003)[1802]. Dissolution théorique d'une masse de *Comp. B* pure dans un sol poreux. Temps de dissolution théorique considérant les effets de taille.	Lynch et al., (2002)[1803]. Particules de 0,04 à 4 mm dans de l'eau, sous agitation. Temps de dissolution basé sur un coefficient de dissolution constant.	Phelan et al. (2003)[1804]. Particules de 0,1 à 1 mm placées dans un écoulement uniforme en milieu poreux. Temps de dissolution basé sur l'expérience.	Lever et al., (2004)[1805]. Particule unitaire de 2 mm placée dans un écoulement au goutte-à-goutte. Temps de dissolution basé sur un taux de perte de masse constant.
Taille des particules d'explosifs (mm)	*Composition B*	*RDX / TNT*	*Composition B*	*Composition B*
mm	an	an	an	an
0,1	0,8	0,005 / 0,001	0,8	0,004
1	20	0,05 / 0,01	20	4
10	800	0,5 / 0,1	-	4 000
100	20 000	-	-	-

Tableau 37 : Comparaison des temps théoriques de dissolution de résidus d'explosifs en fonction de leur taille et pour une précipitation moyenne annuelle de 750 mm[1806].

D'après ces recherches, les particules de résidus (<< 1 mm) dispersées consécutivement à des détonations de haut-ordre se solubiliseraient intégralement dans les sols en moins d'un an. Celles produites par les détonations de haut-ordre lors de destruction par OD (BIP), plus grossières (de quelques millimètres), persisteraient plusieurs dizaines d'années (la valeur de 50 ans est avancée par Taylor et al., (2004) pour leur modèle de dissolution).

Par contre, le temps de dissolution des particules et fragments générés par les détonations de bas-ordre (sur des munitions tirées ou des engins démolis par OD) sont plus incertains. La dissolution simple et totale exigerait plusieurs centaines d'années, mais les auteurs[1807] démontrent que ces fragments progressivement, avec la perte de masse des fractions solubles, s'émiettent, deviennent friables et se désagrègent, ce qui accroît le ratio surface / volume et accélère le processus de dissolution. Ces chercheurs préconisent de ramasser ces gros fragments avant que le phénomène n'ait lieu. Taylor et al., (2004) retient dans son modèle, pour tous les résidus issus de détonations de bas-ordre, un temps de résidence de ces fragments dans les sols de 100 ans.

Le chargement d'UXOs enfouis peut se dissoudre avec des cinétiques largement dépendantes de l'état du *casing* (fêlures, corrosion, etc.), selon un processus de dissolution globale (et non ponctuelle par convection / advection).

[1802] Matyskiela (2003). *Modeling of chemical transport from UXO to surrounding soil.* Final Report submitted to Praxis Environmental Technologies, Burlingame, California.

[1803] Lynch, J.C, J.M. Brannon, and J.J. Delfino (2002). *Dissolution rates of three high explosive compounds: TNT, RDX and HMX. Chemosphere*, 47: 725–734.

[1804] Phelan J.M., S.W. Webb, J.V. Romero, J.L. Barnett, F. Griffin and M. Eliassi (2003). *Measurement and modeling of energetic material mass transfer to soil pore water*—Project CP-1227. Sandia Report 2003-0153.

[1805] Lever J., S. Taylor, L. Perovich, K. Bjella, and B. Packer (in prep) *Dissolution of Composition B*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory

[1806] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit*. p. 54.

[1807] *Ibid.* p. 71.

Les cinétiques de dissolution correspondantes sont très lentes. Taylor et al., (2004) retient dans son modèle un temps de 10 000 ans. Les UXO dont le *casing* est intègre ne débutent un processus de dissolution qu'au terme de perforation par corrosion (en trous d'épingle « *pinhole perforation* »). Le temps de dissolution du chargement par ces perforations est extrêmement long (~10^{10} ans).

Dans une approche volontairement conservatrice, Taylor et al., (2004) néglige le temps de corrosion et retient pour tous les UXOs, affleurant en surface ou enfouis, le temps de dissolution de 10 000 ans[1808].

Les témoignages recueillis auprès de professionnels du déminage en France sont formels : les chargements des munitions ouvertes (et exposées aux eaux météoriques) sont encore majoritairement intègres et que leurs cinétiques de dissolution sont très lentes. Par ailleurs, aucune recherche publiée concernant les cinétiques de dissolution actuelles d'explosifs anciens de la Première Guerre mondiale n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche. Les sels de chlorates et de perchlorates figurent parmi les plus solubles que l'on connaisse, pourtant les explosifs (per)chloratés peuvent subsister longtemps dans les sols du fait de leur mélange intime avec des paraffines hydrophobes, limitant la dissolution (et les flux massiques en ions chlorate et perchlorate émis) et rallongeant aussi de fait les temps de résidence de ces particules dans les sols.

D'autres phénomènes propres au vieillissement des explosifs anciens sont aussi à considérer au regard des résultats de la présente recherche. Les explosifs peuvent évoluer sous l'effet de mécanismes de biotransformation qui peuvent accroître la mobilité et la solubilité des composés entrant dans ces formulations (comme par exemple la transformation biotique du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) en isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT)).

Le retour d'expérience des opérations de vidage des munitions explosives par fusion (dissolution) à l'eau chaude (*wash-out*), comme opérées par F.N. Pickett & Fils en France et en Belgique dans l'entre-deux-guerres (cf. Section 10h du présent manuscrit), montre que les munitions explosives ex-allemandes généraient de grandes quantités de boues et d'insolubles, témoignant d'un chargement explosifs impurs difficilement solubles.

[1808] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit*. p. 72.

4. Résumé et conclusions de la Section 1e

Chaque date anniversaire de l'armistice du 11 novembre 1918, et plus encore durant celles ayant jalonné le centenaire de la Grande Guerre, est l'occasion pour les médias de stigmatiser les traces polluantes qu'aurait laissé, plus de 100 ans après la fin des hostilités, la démesure de l'usage des moyens de l'Artillerie en 1914-1918, une Grande Guerre industrielle qui transforma les anciens champs de blé en champs de bataille puis, en sols pollués. S'appuyant sur les images de la violence de la guerre et ses répercussions directes, visibles et si spectaculaires (les destructions) que nous donnent à voir les archives, un raccourci est opéré pour traduire ces représentations en pollutions sur nos environnements actuels, invisibles. Pourtant les connaissances scientifiques, fiables et objectives, concernant la qualité des sols des anciens champs de bataille sont très parcellaires, locales et ne concernent que les éléments traces métalliques (ETM). La question de la dégradation de la qualité des sols et des eaux en lien avec les activités militaires et les bombardements durant la Grande Guerre s'inscrit dans un champ quasiment vierge de la recherche environnementale.

Les rares études menées sur le terrain, pour les seuls ETM, réputés constitutifs des engins de guerre de 14 – 18, même sur des secteurs intensément bombardés comme à Ypres, n'ont pas montré une dégradation généralisée de la qualité des sols par rapport aux fonds géochimiques locaux non perturbés (pour ces éléments). Des anomalies en métaux ont été mesurées localement çà et là du fait de la présence dans ces sols de fins éléments métalliques dispersés attribués aux engins détonés (induisant une distribution locale des teneurs en métaux dans les sols, marquée par des effets de pépite (*cluster effect*).

Les études sur les autres substances entrant clairement dans la composition de tout ce matériel utilisé sur le front occidental de la Grande Guerre, éminemment plus mobiles et toxiques que les métaux, celles formant les chargements des projectiles et autres engins pyrotechniques notamment (en particulier les composés organiques nitroaromatiques), font non seulement défaut dans ces recherches mais n'apparaissent pas comme un sujet de préoccupation et d'intérêt dans le champ des recherches environnementales en lien avec la Grande Guerre. Il est vrai que ces analyses sont complexes à réaliser pour être conclusives, chronophages et donc couteuses.

De nombreuses recherches ont été menées aux USA dans les années 2000 par l'*US Corps of Engineers* (*Department of Defence Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP)) sur les terrains d'exercice et champs de tir actifs parfois anciens afin d'appréhender, qualifier et quantifier (i) la production et la dispersion des résidus d'explosifs (imbrûlés) consécutivement aux détonations de bas-ordre et haut-ordre de munitions tirées, (ii) les mécanismes et cinétiques de corrosion des casings des UXOs et (iii) les durées de vie des particules imbrûlées dans les sols et leurs cinétiques de dissolution. Ces recherches sur des champs de tir de munitions modernes permettent d'approcher, par analogie et par défaut, les mécanismes en jeu susceptibles de mobiliser les constituants des chargements des munitions tirées sur les champs de bataille de la Grande Guerre vers l'environnement ainsi que leurs dynamiques spatiales et temporelles.

Ces recherches montrent que tous les régimes de détonation sont pourvoyeurs de particules d'imbrûlés dans les sols. Les substances chimiques solubles formant ces particules d'explosifs peuvent être mobilisées vers les sols et les eaux souterraines au contact des eaux météoriques par le phénomène de dissolution. Ces cinétiques de dissolution dépendent des conditions environnementales (pluviométrie, température, etc.), de la solubilité de chacun des composés présents dans les formulations d'explosifs, et de la nature des assemblages.

Ainsi, même si les chlorates (ClO_3^-) et perchlorates (ClO_4^-) figurent parmi les sels les plus solubles, la cinétique de dissolution des explosifs (per)chloratés, bien qu'inconnue, est vraisemblable très faible du fait du mélange de ces sels avec de la paraffine (insoluble et hygrophobe). Ces fragments d'explosifs peuvent ainsi persister dans les sols sur de longues périodes de temps et libérer de faibles flux d'ions chlorate et perchlorate (exprimés par exemple en g / an / km^2) vers les eaux souterraines.

La grande majorité des engins de guerre tirés sur ces terrains fonctionna normalement et suivit un régime de détonation de haut-ordre durant lequel les engins furent intégralement disloqués et le chargement décomposé laissant un faible pourcentage d'imbrûlés résiduels (par rapport à la masse du chargement initial) estimé par les études nord-américaines, pour des munitions modernes sur des champs de tir actifs, à 0,001 %. Ainsi, un bombardement par 1 000 obus français de 75 mm de 7 kg[1809] renfermant de l'ordre de 500 g d'explosifs (*Mélinite*) chacun, laisserait sur la surface impactée de l'ordre de 5 g de résidus d'explosifs, de l'ordre de 14 à 120 g pour des projectiles de 155 mm et de 300 à 600 g pour des calibres de 280 mm. Ces quantités apparaissent insignifiantes si on rapporte les masses résiduelles à la surface et plus encore au volume de sol impacté, avec lequel ces résidus ont été mélangés par le brassage des explosions. Ces particules solides d'explosifs imbrûlés finement dispersées autour du point de détonation possèdent une granulométrie inférieure au millimètre et sont de fait rapidement dissoutes (en moins d'un an) au contact des eaux météoriques. Durant la Grande Guerre, le régime de détonation de haut-ordre fut suivi par environ 75% des projectiles. Les imbrûlés issus de ces détonations ne peuvent constituer, plus de 100 ans après l'arrêt des hostilités des sources actuelles encore actives, dégradant toujours la qualité des eaux souterraines. Les quantités de métaux formant plus des 4/5e en masse des engins tirés, ne se décomposant pas au moment des détonations, sont sans aucune commune mesure avec les quantités de résidus d'explosifs imbrûlés introduits dans les sols. Les masses seraient pour le 75 mm de l'ordre de 7 * 1 000 kg en métaux, soit 7 tonnes pour un bombardement de 1 000 engins. Plus les tirs sont concentrés, plus la densité des impacts est élevée, plus la masse de résidus d'explosifs et de métaux par unité de surface et de volume est élevée, plus les teneurs moyennes sont importantes. Cette connaissance de la densité des tirs à l'échelle locale (et non à celle souvent publiée des champs de bataille) est essentielle, mais elle est non documentée.

Les données concernant le pourcentage de munitions ayant suivi un régime de déflagration (détonation de bas-ordre), ainsi que sur le taux d'imbrûlés après le dysfonctionnement de ces projectiles, sont éminemment plus complexes à acquérir. Selon les hypothèses et valeurs annoncées par les études nord-américaines, la détonation de bas-ordre d'un seul engin tiré libèrerait dans les sols, au point d'impact, une masse résiduelle environ 5 fois plus élevée que celle générée par les détonations de haut-ordre de 1 000 projectiles. Les fréquences de LOD des munitions modernes tirées sur les champs de tir actifs en Amérique du Nord, s'établiraient entre 0,01 et 0,001%. Ces valeurs restent inconnues pour les munitions tirées durant la Grande Guerre sur le front occidental. Lors des déflagrations, les *casings* des projectiles sont partiellement déchirés et le chargement expulsé et dispersé autour du point de détonation en une multitude de fragments pluri millimétriques à centimétriques, plus au moins grossiers (*chunk* et *flakes*). De l'explosif adhère généralement encore aux parties les plus solides des projectiles (ogives et culots). Ces fragments peuvent subsister dans les sols d'autant plus longtemps que leur taille (ratio masse / surface) est élevée, généralement plusieurs dizaines à centaines d'années. La dissolution des fractions solubles de ces fragments conduit à leur émiettement progressif qui concourt à accélérer les cinétiques de dissolution. Ces fragments peuvent donc constituer encore aujourd'hui des sources actives et rémanentes de pollution et influencer la qualité des sols et des eaux souterraines par dissolution.

[1809] Bélot, H. Communication personnelle.

Mais dispersés à l'échelle des zones bombardées, ces fragments ne peuvent générer des zones de pollution concentrées et contribuent certainement à alimenter un marquage diffus des eaux souterraines.

Détonations de bas-ordre et de haut-ordre contribuèrent à introduire instantanément des résidus d'explosifs dans les sols. Mais les détonations des projectiles tirés ne furent pas les seules voies permettant l'introduction dans l'environnement de substances issues des matériaux explosifs anciens. 25% environ des tirs d'artillerie sur le front occidental durant la Première Guerre mondiale se soldèrent par des incidents de tir, les projectiles en question connaissant alors soit une détonation partielle de bas-ordre, soit un dysfonctionnement total à l'origine de la « pollution pyrotechniques » des champs de bataille (présence sur et dans les sols d'engins tirés et non explosés ou UXOs). Les UXOs s'assimilent à des réservoirs métalliques (*casings)* confinant des substances chimiques, les isolant de l'environnement. Ces enveloppes métalliques subissent au contact de l'oxygène, de l'eau et des conditions environnementales, une dégradation, puis une désagrégation, désignée par corrosion, se traduisant à plus au moins long terme par la perte de tout ou partie de l'intégrité des *casings* et à la mise en contact des chargements avec l'environnement.

L'exposition des chargements à l'environnement s'effectue sur des échelles de temps dépendantes des cinétiques de corrosion (variant selon la nature des métaux, de l'état des casings et des conditions environnementales) et les épaisseurs des casings. La corrosion est un phénomène complexe, faisant appel à de nombreux mécanismes chimiques, électrochimiques, et combinant une corrosion généralisée et une corrosion ponctuelle (perforante). Aucune recherche publiée ciblant les mécanismes et cinétiques de corrosion des enveloppes des UXOs de la Première Guerre mondiale n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche. Les recherches menées sur les munitions modernes montrent que le processus de corrosion suit un processus en au moins trois phases avec des cinétiques très lentes. Les professionnels du déminage sont catégoriques : les engins extraits des sols cent ans après leur tir sont globalement en bon état.

Des cinétiques inférieures à 0,1 $mm.an^{-1}$ et une valeur de 0,025 $mm.an^{-1}$ sont généralement retenues dans les modèles de corrosions des études américaines (ERDC (2014)) et allemandes (LfU (2009) Land de Bavière). A ce rythme et au regard des épaisseurs des parois des casings des munitions de la Grande Guerre, des siècles seraient encore nécessaires avant que leurs chargements soient exposés à l'environnement.

Les résidus issus des détonations de bas-ordre seraient, au regard de l'état actuel des connaissances, les principaux contributeurs aux masses résiduelles des chargements explosifs dispersées sur les terrains bombardés, et potentiellement aussi contributeurs aux flux massiques des substances solubles vers les eaux souterraines. Mais avec le temps et la disparition progressive des enveloppes métalliques par corrosion et, concomitamment la diminution des fractions solubles des fragments d'explosifs déjà introduits dans les sols, la contribution des UXOs aux émissions des composés chimiques formant les chargements vers l'environnement ne cessera de croître.

L'hétérogénéité des conditions physico-chimiques régnant dans les sols hôtes des UXOs le long des anciennes lignes du front occidental, la diversité des engins, de leur état après impact, de l'épaisseur de leurs parois, laissent présager une libération différée, incontestablement progressive, difficilement prévisible dans le temps comme dans l'espace, des constituants solubles, mobiles et persistants, toxiques formant les chargements.

Les cinétiques de corrosion des *casings* et de dissolution des chargements étant très lentes, l'empreinte environnementale de la Grande Guerre sur nos sols et sur les eaux souterraines persistera encore sur des échelles de temps sans aucune commune mesure avec la durée de ce conflit. Un marquage diffus rémanent par les ions perchlorate, chlorate (très mobiles et persistants) et en moindre mesure par les NAC les plus mobiles et leurs sous-produits de transformation environnementale est vraisemblable. Se pose la question si oui ou non ce qui a été introduit dans les sols peut constituer des sources susceptibles de dégrader l'environnement mais surtout si ces dégradations peuvent remettre en cause des usages actuels des milieux.

Les recherches nord-américaines pointent également le fait que les munitions détruites par pétardement (*Blown In Place,* BIP) suivent aussi un régime de détonation de bas-ordre. La démolition dans des centres de destruction localisés de grandes quantités de munitions par BIP, rassemblées là intentionnellement pour y être liquidées, peut potentiellement être à l'origine d'introduction dans les sols de fortes densités et tonnages de fragments d'explosifs et donc générer des zones de pollutions concentrées. La section qui suit est consacrée à l'analyse du potentiel polluant des destructions par *Open-Detonation*, à la typologie des pollutions et des sites de destruction par pétardement.

Section 2e
Terrains de destruction par éclatement (*Open Detonation*) de la Première Guerre mondiale. Sources ponctuelles de pollution concentrée ? Etat des connaissances et discussion

1. Introduction de la Section 2e

Les tirs de l'artillerie ne furent pas les seules activités potentiellement polluantes impliquant, sur et aux abords des anciens champs de bataille, les munitions et autres engins pyrotechniques. La recherche historique constituant le premier volet du présent manuscrit met clairement en évidence l'existence d'opérations de récupération, de rassemblement de munitions tirées, ou non tirées mais obsolètes, hors service, durant la guerre mais surtout dans l'immédiate sortie de guerre et l'entre-deux-guerres, périodes durant lesquelles ces activités de liquidation des REG prirent des dimensions industrielles, mais aussi commerciales, inédites. Ces recherches et l'inventaire national des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres (*Hubé, D. (2019) 1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales. Rapport final. BRGM/RP-68476-FR. Janvier 2019*) montrent qu'environ ¾ des presque 200 sites de liquidation des REG identifiés correspondent à des terrains où les démolitions furent opérées par éclatement (pétardement, *Open-Detonation* (OD)). Le principe de la destruction par éclatement est simple. Il est décrit dans le volet historique du présent manuscrit (cf. Section 7h) et dans le manuel du Département de la Défense US (*Department of Defence*, *DoD*) référencé *6055.9-M* en ces termes « *An open-air process used for the treatment of excess, unserviceable, or obsolete munitions whereby an explosive donor charge initiates the munitions being treated*[1810] ». Ces destructions se basent sur la transmission par « sympathie » d'une détonation d'une charge explosive initiale (encore dénommée « donneur »), contrôlée (au moment et aux endroits voulus) et volontaire, actionnée à distance. Le donneur était généralement un pain d'explosif (ou pétard), avec ou sans cordon détonant ou encore, au regard des renseignements figurant dans les archives, des munitions et notamment des grenades et engins de tranchées (chargés d'explosifs très puissants et brisants comme ceux à base de perchlorate). Ces éclatements étaient pratiqués sur des engins isolés et épars ou sur des engins rassemblés en tas (désignés par « fourneaux »). Il s'agit d'une des plus anciennes et rudimentaires manières de liquider des engins de guerre explosifs et autres matières explosibles. Cette technique est aussi ancienne que la conception des projectiles d'artillerie. Les artificiers imaginèrent et mirent en œuvre différents designs de fourneaux d'éclatement selon la typologie des engins à détruire, en particulier pour les engins à chargements chimiques liquides (cf. Section 1h du présent manuscrit). L'OD fut pratiquée sur une très grande variété de matériels et matériaux pyrotechniques : projectiles d'artillerie de campagne, lourde, de tranchée de tous calibres et chargements (explosifs, fumigènes, éclairants, incendiaires, chimiques), bombes d'aviation, cartouches et gargousses, explosifs en vrac ou en caisses, pétards, signaux et autres artifices, etc. Les destructions par OD sont encore pratiquées de nos jours en France et à travers le monde.

[1810] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019). *Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions.* Washington, D.C: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25140.

Cette sous-section s'attache dans un premier temps à qualifier si ces sites de pétardement contribuent ou non, ou encore peuvent contribuer, à introduire dans les sols et/ou les eaux, au droit et aux abords des anciens champs de bataille, des composés d'origine pyrotechniques issus de munitions anciennes de la Grande Guerre.

Dans un second temps, cette recherche vise à identifier et à caractériser les mécanismes en jeu lors des OD susceptibles d'avoir introduits dans les sols ces composés constituant des REG, mais aussi éventuellement générés par la détonation elle-même. Enfin, elle s'attache à établir les caractéristiques morphologiques, physiques, chimiques, des terrains de destruction par OD, en considérant notamment (i) les résultats des recherches et études allemandes et nord-américaines mais aussi (ii) les observations, reconnaissances et les investigations originales de terrain menées entre 2015 et 2023 sur différentes site de pétardement (notamment ceux de Vaudoncourt, Noire Fontaine, dans le canton de Spincourt, Juvissy, du Ravin du Chaufour, en Meuse, Barenton-Bugny dans l'Aisne, Fampoux dans le Pas-de-Calais et Trélon dans le département du Nord).

Le parti a été pris dans le cadre de cette recherche de développer le cas spécifiques des deux champs d'explosion du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander de Vaudoncourt et Loison , dans le département de la Meuse, pour lesquels des observations de terrain ont été effectuées et des données originales acquises à la faveur d'une démarche d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires inscrite dans un contexte de crise médiatico-politique initiée en 2015 par la découverte fortuite des pollutions historiques.

2. Etat des connaissances sur la qualité des sols impactés par les destructions par OD et retours d'expérience étrangers

2.1. EXEMPLE DE L'ALLEMAGNE

Aucune étude ou recherche publiée visant à caractériser les conséquences des opérations de pétardement (en masse ou d'engins épars) de munitions et autres REG de la Première Guerre mondiale sur la qualité des sols et/ou des eaux souterraines actuelles n'a été identifiée dans la littérature scientifique dans le cadre de cette recherche. Cependant, des études parfois exhaustives et détaillées ont été conduites (publiées et rendues publiques) dans un but environnemental sur des terrains de destruction postérieurs à la Seconde Guerre mondiale, qu'il s'agisse (i) de l'Allemagne ou de la Bosnie-Herzégovine, (ii) de démolitions opérées dans le cadre du désobusage et du déminage *post-bellum* ou de la destruction d'engins tirés non explosés ou encore d'engins obsolètes comme sur les champs de tir actifs en Amérique du Nord. L'Allemagne fait figure de précurseur en matière de gestion des sites pollués par des composés d'origine pyrotechnique en Europe car elle eut à gérer, notamment dans les années 90, des situations de pollutions ponctuelles et concentrées à forts enjeux[1811]. L'Allemagne fut confrontée à la question du passif environnemental en lien avec la liquidation des REG de la *Wehrmacht* à l'issue de la Seconde Guerre mondiale, dans sa partie occidentale (sous contrôle US) comme orientale, (sous contrôle soviétique). Les médias allemands firent l'échos de découvertes inattendues de pollutions liées à cet épisode de sortie de guerre sur leur territoire.

[1811] Hubé, D., Bausinger, T. (2014). *Marquage pyrotechnique : analyse de la problématique environnementale. Comparatif entre Allemagne et France. Géologues* n°179. p 32 – 36.

Le cas de Ratisbonne

Ainsi par exemple, dès 2002, des investigations et études furent menées sur le site de l'ancien champ d'explosion de Hainsacker dans le district de Ratisbonne (*Regensburg* dans le Land de Bavière). Des munitions datant de la Seconde Guerre mondiale y furent éliminées en grandes quantités par l'Armée américaine puis, par la société d'État d'enregistrement pour le bien public (STEG) d'octobre 1946 à avril 1954. Selon les recherches de Heinz Findeis de Lappersdorf cette quantité était au total de 75 000 tonnes. Environ 50 000 tonnes furent détruites, 10 000 tonnes démantelées et environ 15 000 tonnes furent renvoyées dans leur pays d'origine[1812]. Un exploitant d'eau du secteur, de raison sociale REWAG, souhaitant renforcer ses capacités de distribution d'eau décida d'étendre son champ captant par le forage de deux nouveaux captages en aval du site de Hainsacker. La REWAG avait connaissance de l'existence de ce site, mais considérant les résultats d'un diagnostic fondés sur 65 échantillons de sol prélevés entre 2002 et 2013 qui concluait sur l'absence de risque, investit toutefois dans ces deux nouveaux puits.

En 2013, l'administration du district eut connaissance de la présence de résidus d'explosifs dans des échantillons d'eau souterraine. Les analyses montrèrent, parfois de façon spectaculaire, une augmentation des concentrations de résidus d'explosifs et de leurs sous-produits solubles dans les eaux. Le REWAG, ne fut pas autorisée par le Ministère de la Santé à mettre en exploitation ses deux nouveaux captages d'eau potable impactés par l'occurrence de substances typiques des constituants des REG, grevant ainsi des millions d'euros d'investissement[1813], ce qui entraîna un contentieux et la judiciarisation de l'affaire.

Guide méthodologique pour l'évaluation des conséquences environnementale des OD

En 2009 parut une publication centrale concernant l'évaluation des impacts environnementaux de destruction massive de munitions par OD. Des études environnementales furent réalisées sous l'égide du l'Administration pour l'environnement du Land de Bavière (Allemagne) (*Bayerisches Landesamt für Umwelt*) afin de caractériser la typologie des pollutions des sols induites par pétardement sur des sites spécifiques et dédiés, de projectiles et bombes en tous genres, abandonnés au terme de la Seconde Guerre mondiale (LfU, 2005)[1814]. Ces recherches, comprenant des diagnostics « pilotes » des sols (reconnaissance de la qualité des sols) et pyrotechniques (reconnaissance des engins) sur des sites de pétardement (désignés par polygones d'éclatement), ont permis (i) d'identifier la nature et la distribution dans les sols des matériaux résiduels issus des REG détruits par éclatement, (ii) de catégoriser les polygones de destruction selon leurs dimensions et les tonnages éliminés, (iii) de comprendre les mécanismes polluants en jeu susceptibles d'impacter la qualité des eaux souterraines, (iiii) de dégager des méthodologies et des orientations métrologiques afin de caractériser et hiérarchiser ces sites eu égard à leur potentiel polluant pour les eaux souterraines. Ces recherches allemandes du LfU du Land de Bavière s'appuient aussi par ailleurs sur une synthèse de l'état des connaissances de la distribution des résidus d'explosifs lors de détonations d'engins de guerre sur des champs de tir actifs en Amérique du nord, rassemblée dans un rapport du *Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP) du DoD (*Departement of Defence*) publié en 2000 sous la référence « *SERDP - ER-11552 Distribution and Fate of Energetics on DoD Test and Training Ranges*[1815]».

[1812] Süddeutsche Zeitung 30. September 2015. Kriegsfolgen. Sprengstoff im Wald https://www.sueddeutsche.de/bayern/kriegsfolgen-sprengstoff-im-wald-1.2670304

[1813] *Ibid.*

[1814] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

[1815] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.2. Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA*, *op. cit.*

Ces études ont déjà été partiellement exploitées dans le cadre de la présente recherche dans la Section 1e précédente. En 2004 parut une autre étude diligentée par l'*U.S. Army Corps of Engineer* rassemblant l'état des connaissances sur les modalités d'introduction dans l'environnement de composes formant les munitions tirées et non explosées (UXO, *Unexploded Ordnance*), parmi lesquelles le pétardement (OD, *Open Detonation*)[1816], sous le titre « *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations?* » puis en 2004 toujours *« SERDP Final Technical Report - UXO Corrosion – Potential Contamination Source[1817] ».*

Les résultats des études du LfU du Land de Bavière furent consignés et formalisés dans un guide méthodologique associé à dix annexes richement documentées et illustrées[1818]. Ces études de référence sont citées dans ce qui suit.

Le processus de recherche entreprit par le LfU est parti du double constat que (i) les sites de pétardement en masse de munitions anciennes représentaient dans les années 90 plus de 100 sites potentiellement pollués constituant de la sorte une fraction importante des sites potentiellement pollués par les activités militaires historiques en Bavière[1819], (ii) les résultats obtenus dans le cadre de caractérisation des pollutions des premiers sites apparurent contrastés et difficilement compréhensibles. Ces recherches (et les guides qui en découlèrent) étaient destinées à doter les acteurs des sites et sols pollués ayant à caractériser des sites de pétardement de masse de munitions anciennes d'un protocole commun pour favoriser l'uniformisation des pratiques et rendre les résultats cohérents pour être comparables entre eux. Il s'agissait aussi de répondre à des enjeux environnementaux et sociétaux. Aucun document analogue, rendu public, n'existe en France à l'heure actuelle même si des efforts pour engager un inventaire à l'échelle nationale ont été entrepris.

D'autres recherches et caractérisations furent réalisées en Allemagne sur de nombreux sites de destruction d'engins de guerre, souvent implantés au sein du périmètre d'anciennes installations industrielles de production de poudres et d'explosifs et/ou de chargement de projectiles déjà actifs durant la Première Guerre mondiale.

[1816] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit.*

[1817] Parker, B. Chendorain, M., Lloyd, S. (2004). SERDP Final Technical Report - *UXO Corrosion – Potential Contamination Source*, *op. cit.*

[1818] Anhang 1 Historische Hintergrundinformationen (noch in Bearbeitung) / Annexe 1. Information historiques de contexte (encore en cours d'élaboration). Anhang 2.1 Erfahrungen bei der Sprengplatzbearbeitung in Deutschland / Annexe 2.1. Retour d'expérience sur l'étude des terrains d'explosion en Allemagne. Anhang 2.2 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA/ Annexe 2.2. Etat des connaissances sur les champs de tir et terrains d'explosions aux USA. Anhang 2.3 Vergleich von Untersuchungsmethoden / Annexe 2.3. Comparatif entre méthodes d'investigations. Anhang 2.4 Gefährdungsabschätzung Streugebiete / Annexe 2.4. Evaluation des risques des zones de projection. Anhang 2.5 Methodenvergleich zur Lokalisierung von Sprengtrichtern / Annexe 2.5. Comparatif de méthodes de localisation des entonnoirs d'éclatement. Anhang 2.6 Exemplarische Untersuchung von Beutemunition / Annexe 2.6. Investigations cas d'école des munitions prises de guerre. Anhang 2.7 Hinweise zum Umweltverhalten Explosivstofftypischer Verbindungen / Annexe 2.7. Indications sur le comportement environnemental des composés typiques des explosifs. Anhang 3.1 Abkürzungsverzeichnis / Glossar / Annexe 3.1. Liste des abréviation et glossaire. Anhang 3.2 Quellen-/Literaturverzeichnis / Annexe 3.32 Sources et références bibliographiques.

[1819] Environ 300 000 tonnes de munitions auraient été démolies par pétardement par la Wehrmacht, par l'US-Army, par un organisme d'Etat et des entreprises privées sur ce territoire de Bavière durant la sorte de la Seconde Guerre mondiale.

Tunnel de détonation

Des études allemandes originales ont été mises à disposition par leurs auteurs pour alimenter la présente recherche. Ainsi Bausinger (2014)[1820] a mesuré et étudié la nature et les teneurs des sols et matériaux en résidus d'explosifs libérés dans l'environnement suite à la détonation de munitions anciennes datant de la Seconde Guerre mondiale dans un tunnel de détonation (cf. Figure 275 ci-dessous). Il s'agissait d'un dispositif d'éclatement temporaire.

Suite à la découverte d'environ 1 000 obus (comprenant des obus antichars de 37 mm, etc.) datant de la Seconde Guerre mondiale en Allemagne, les services du déminage (*Kampfmittelräumdienst*) décidèrent de procéder à leur destruction par pétardement, sur le lieu de leur découverte, dans un conduit blindé, afin de limiter les effets de souffle et la projection d'éclats et matériaux. Un échantillonnage des sols (prise d'échantillon d'un kilogramme) aux deux extrémités du conduit fut réalisé post-détonation pour l'analyse au laboratoire des composés énergétiques typiques de la Seconde Guerre mondiale.

Figure 275 : Tunnel de détonation ; installation temporaire de destruction par éclatement[1821].

Cette liste analytique a été élargie aux stabilisants / flegmatisants des explosifs (*Centralite, Akardite*, etc.). L'ensemble a été analysé sur éluats après lixiviation de 24 heures avec agitation (avec un rapport solide / liquide d'un). Les résultats analytiques sont rassemblés dans le Tableau 38 page suivante.

Ces analyses montrent :

- La détection dans ces matériaux de résidus d'explosifs;
- De fortes teneurs des sols en nitramines (> 10 $mg.kg^{-1}$ MS) lixiviables (mobiles) : RDX, HMX et leurs métabolites, principalement MNX et TNX (cf. Figure 276). Les plus fortes teneurs ont été mesurées dans les résidus présents dans le tunnel de détonation ; on constate donc que le RDX s'est transformé en partie, par réduction, en dérivés mono-, di- et tri-nitrosés, moins stables et plus facilement biodégradables (jusqu'à la minéralisation) ;
- De fortes teneurs (> 10 $mg.kg^{-1}$ MS) en TNT et ses métabolites (isomères d'ADNT) ;
- Des traces de *Centralite* (stabilisant des compositions d'explosif, 1,3-diéthyl-1,3-diphénylurée).

[1820] Bausinger – Seminar Explosivstoffe – 02/07/2014 – IWU Magdeburg. *Temporärer Sprengplatz als Kontaminationsquelle*. Communication personnelle.

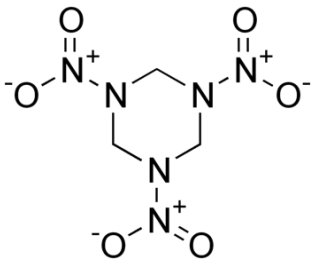
[1821] *Ibid.*

Composé	Nature	Unité	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Echantillon 4	Echantillon 5	Matériaux du tunnel de détonation
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT, *Tolite*)	Explosif	µg.L^{-1}	**5,96**	**0,92**	<0,5	<0,5	**0,62**	**25,6**
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Métabolite du TNT		**1,33**	**0,67**	<0,5	<0,5	<0,5	Interférences
4-Amino-2,6-dinitrotoluène			**4,04**	**1,9**	**0,88**	**0,82**	**0,83**	Interférences
4-Amino-2-nitrotoluène	Métabolite du TNT et DNT		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
3,5-Dinitroaniline	Explosifs		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
2,4-Dinitrotoluène			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	Interférences
2,6-Dinitrotoluène			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	Interférences
Hexogène (*RDX*)	Explosifs post WWI		**9 574**	**4 400**	**4 537**	**1 306**	**588**	**35 097**
Octogène (*HMX*)			**4,21**	**1,68**	**0,77**	<0,5	<0,5	**22**
MNX	Métabolite mononitrosé du RDX		**233**	**413**	**280**	**64,2**	**30**	**1 642**
DNX	Métabolite dinitrosé du RDX		**21,2**	**75,2**	**34,1**	**7,72**	**2,69**	**209**
TNX	Métabolite trinitrosé du RDX		**34,9**	**197,9**	**56,1**	**47,7**	**17,5**	**1 481**
1,3,5-Trinitrobenzène	Impureté du TNT		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
PETN (*Penthrite, Nitropenta*)	Explosif		Interférences	Interférences	<1,25	<1,25	<1,25	Interférences
N-Ethyl-N-Phényluréthane	Stabilisants		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**45,9**
Diphénylamine			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
N,N-Diphénylurethane			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**7,03**
Akardite 1			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Akardite 2			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Centralite 1			**0,78**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**52,8**
Centralite 2			<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

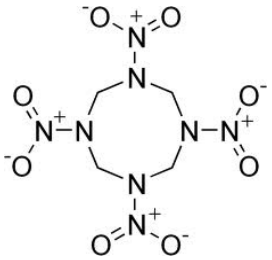
Tableau 38 : Résultats analytiques des résidus d'explosifs dans les sols et matériaux d'un site temporaire de pétardement de munitions allemandes datant de la Seconde Guerre mondiale[1822].

[1822] Bausinger – Seminar Explosivstoffe – 02/07/2014, *op. cit.*

Les formules structurales des explosifs nitrotriazines (RDX et HMX) ainsi que la chaine de biodégradation séquentielle du RDX sont présentés dans la Figure 276 suivante.



RDX, *Hexogène*, Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine «*Research Department Explosive* » ou « *Royal Demolition Explosive* ».



HMX, *Octogène*, Octahydro- 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine « *High Melting eXplosive* »

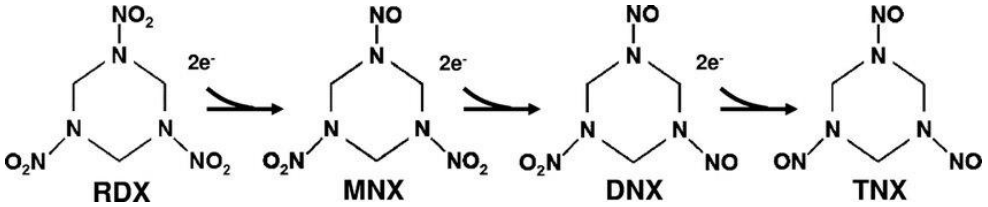


Figure 276 : Formules structurales des RDX et HMX et biodégradation séquentielle du RDX[1823].

Dans le cas présent, le pétardement de ces munitions anciennes a laissé dans les matériaux environnants des teneurs de plusieurs dizaines de $mg.kg^{-1}$ de résidus d'explosifs (et en particulier de RDX) et de surcroît mobilisables au contact des eaux météoriques (ces résidus étant lixiviables). Les volumes de sol impactés n'ont pas été quantifiés, aussi, le ratio entre la masse de résidus introduite dans ces sols versus la masse constituant les chargements des projectiles éliminés, n'a pas été rendue possible.

2.2. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSES DES SOLS SUR TROIS SITES DE PETARDEMENT EN FRANCE

2.2.1 Sites investigués

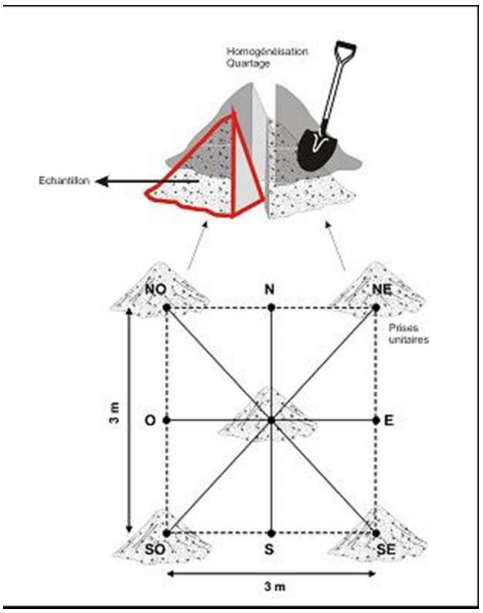
Les trois sites de destruction de munitions par OD dont la qualité des sols a été investiguée à titre exploratoire sont, (i) le site de destruction de REG du ravin du Chaufour à Douamont (département de la Meuse) et (ii) le terrain d'éclatement de la *C-Factory* (secteur sud) de F. N. Pickett & Fils à Trélon (département du Nord). Le troisième site correspond au point de détonation après la destruction par OD par le Service du déminage de trois obus d'artillerie de campagne de 1914-1918 en plein champ à Noire Fontaine sur la commune de Vaudoncourt (département de la Meuse)

2.2.2 Protocoles d'échantillonnage des sols et d'analyses différées au laboratoire

L'échantillonnage des sols a été effectué selon un protocole opératoire spécifique aux polluants du type « explosifs », présents dans les sols en particules solides discrètes, de composition complexe, finement disséminées, afin de s'assurer de la meilleure représentativité de l'échantillonnage puis des analyses différées au laboratoire.

[1823] Kwon, Man Jae & Finneran, Kevin. (2006). *Microbially Mediated Biodegradation of Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5- Triazine by Extracellular Electron Shuttling Compounds. Applied and environmental microbiology*. 72. 5933-41. 10.1128/AEM.00660-06.

Il s'agit du protocole recommandé par le guide méthodologique spécifique à la caractérisation des pollutions en lien avec les terrains de destruction par *Open Detonation* (OD) intitulé *Schwendner, A. (2009) LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.3 Vergleich von Untersuchungsmethoden.* Il est dérivé des travaux sur l'échantillonnage des résidus solides particulaires dispersés d'explosifs dans les sols de Walsch et al., (2002)[1824].



Selon qu'il s'agisse de sol de surface en environnement agricole avec des sols remaniés par les labours ou des sols en place non destructurés, les profondeurs d'échantillonnage ont été adaptées ([0-5 cm] dans le premier cas de figure et [0-40 cm] dans le second). L'échantillonnage composite (cf. Figure 277 ci-contre) consiste à homogénéiser dans une bassine en polyéthylène 5 à 10 kg de sols, issus de 5 à 10 prises d'échantillons unitaires, collectées sur une surface de 3 x 3 m environ. Dans un second temps, on échantillonne 1 à 2 kg de matériau composite dans la bassine. Les analyses s'effectuent au laboratoire sur un extrait de ces sols correspondant à un lixiviat au rapport 1 kg de sol /1 kg d'eau sur 24 heures.

Figure 277 : Constitution d'un échantillon de type mélange suivant une configuration en étoile des prises unitaires.

Cette méthode permet de limiter les effets « pépite » induits par la distribution particulaire dispersée des particules solides d'explosifs et de rendre compte de la fraction mobile (dans les eaux) des composés entrant dans les formulations des explosifs et toxiques de guerre présents dans les résidus. Par ailleurs, le rapport 1 :1 entre matrice et éluât se rapproche des conditions naturelles de mobilisation des polluants.

Les analyses des NAC, des toxiques de guerre, de leurs impuretés et sous-produits de transformation environnementale ont été réalisées au laboratoire sur les éluats suivant la norme DIN EN ISO 22478 (*Qualité de l'eau - Dosage de certains explosifs et de composés apparentés - Méthode utilisant la chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP) avec détection UV (ISO 22478:2006) - Version allemande EN ISO 22478:2006*), selon les méthodes KORA-TV 5 (2008)[1825] pour l'acide picrique notamment ou des méthodes internes (Envilytix GmbH).

[1824] Walsh, M.E., C.A. Ramsey, and T.F. Jenkins (2002). *The effect of pArticle size reduction by grinding on sub-sampling variance of explosives residues in soil. Chemosphere*, 49: 1267–1273.

[1825] Joos, A (2008). KORA Leitfaden. *Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei sprengstofftypischen Verbindungen. Prozessverständnis*, *op. cit.*

Les composés explosifs, toxiques de guerre et leurs sous-produits de transformation environnementale ont été recherchés au laboratoire (Envilytix GmbH), associés à la réalisation d'empreintes chromatographiques pour la recherche systématique et qualitative des liaisons organiques, par GC/MS[1826] et HPLC/DAD[1827]. Ces empreintes permettent de contrôler l'éventuelle présence de composés qui pourraient échapper aux recherches ciblées et quantitatives (liste des paramètres analytiques). Les Eléments Trace Métalliques (ETM) ont été analysés par ICP-MS selon la norme DIN EN ISO 17294-2(A) après extraction et minéralisation à l'eau régale.

Le choix des composés analysés (qu'il s'agisse des éléments inorganiques ou des composés organiques) repose sur (i) le retour d'expérience sur la connaissance des cortèges formant les pollutions d'origine pyrotechniques, (ii) l'analyse historique sur la constitution des munitions et autres matières et matériels pyrotechniques de la Première Guerre mondiale (cf. Section 1h du présent manuscrit), (iii) la connaissance du devenir environnemental des éléments constitutifs des engins de guerre (cf. Section 4h du présent manuscrit).

2.2.3 Destruction par OD de trois obus d'artillerie de campagne à Vaudoncourt

Au printemps 2017, les personnels du Déminage (Sécurité civile), centre de Metz, procédèrent à Vaudoncourt (Noire Fontaine), suite à un signalement par la mairie, à la destruction par explosion en plein champ, sur place, en dehors des zones de pollutions historiques reconnues, de trois obus d'artillerie de campagne datant de la Première Guerre mondiale. Trois échantillons de sol furent prélevés dans la dépression métrique creusée par la détonation le lendemain de l'explosion (par beau temps). Ces sols furent analysés en recherchant les paramètres typiques des explosifs de la Grande Guerre (mais également des explosifs plus modernes (RDX, HMX) et certains métabolites des TNT et DNT) par le laboratoire spécialisé allemand Envilytix GmBH, Wiesbaden (Allemagne) possédant les standards et méthodes pour ces dosages. Il s'agissait d'analyses sur éluats (après lixiviation selon un ratio solide / liquide d'un).

Les résultats analytiques sont consignés dans le Tableau 39 page suivante.

De toute évidence, ce pétardement de trois munitions a laissé dans les sols des résidus d'explosifs, avant tout de l'acide picrique et des dérivés des DNT et TNT. Les résultats de l'analyse des trois échantillons pourtant collectés dans un périmètre de 1 x 1 m environ, se caractérisent par une grande hétérogénéité des teneurs mais aussi de la nature des composés majeurs : l'échantillon montrant les plus fortes teneurs en 2,4,6-trinitrophénol (acide picrique) ne coïncide pas avec celui majoritairement marqué par les nitrotoluènes et leurs sous produits de transformation (isomères des amino-dinitrotoluènes). Ces trois obus (75 et 77 mm) renfermaient environ 3 x 500 g d'explosifs brisants. Les quelques milligrammes lixiviables (solubles) mesurés dans les sols ne représentent qu'une infime fraction du chargement initial visé par la destruction (1 500 000 mg). Les échantillonnages réalisés ne permettent pas d'estimer le ratio massique entre résidus et chargement initial

[1826] Chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse.

[1827] « *High performance liquid chromatography* » couplé à un détecteur à barrette de diodes (DAD).

Composé	Nature	Unité	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Hexogène (RDX)	Explosifs post WWI	µg.L^{-1}	<0,5	<0,5	<0,5
Octogène (HMX)			<0,5	<0,5	<0,5
2-Amino-4,6-dinitrotoluène (2-ADNT)	Métabolites du TNT		<0,5	<0,5	<0,5
4-Amino-2,6-dinitrotoluène (4-ADNT)			<0,5	<0,5	<0,5
3,5-Dinitroaniline (3,5-DNA)	Explosifs		<0,5	<0,5	<0,5
2,4-Dinitrotoluène (2,4-DNT)			**9,75**	**5,69**	**274**
2,6-Dinitrotoluène (2,6-DNT)			**1,07**	<0,5	**28**
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT *Tolite*)			<0,5	<0,5	<0,5
1,2-Dinitrobenzène (1,2-DNB)			<0,5	<0,5	<0,5
1,3-Dinitrobenzène (1,3-DNB)			<0,5	<0,5	<0,5
2-Nitroaniline (2-NA)			<0,5	<0,5	<0,5
3-Nitroaniline (3-NA)			<0,5	<0,5	**2,76**
1-Nitronaphtalène (1-NN)			<0,5	<0,5	**1,07**
2-Nitronaphtalène (2-NN)			<0,5	<0,5	<0,5
1,3-Dinitronaphtalène (1,3-DNN)			<0,5	<0,5	<0,5
1,5-Dinitronaphtalène (1,5-DNN)			<0,5	<0,5	<0,5
1,8-Dinitronaphtalène (1,8-DNN)			**0,57**	<0,5	**4,56**
1,3,5-Trinitronaphtalène (1,3,5-TNN)			<0,5	<0,5	<0,5
1,3,8-Trinitronaphtalène (1,3,8-TNN)			<0,5	<0,5	<0,5
1,4,5-Trinitronaphtalène (1,4,5-TNN)			<0,5	<0,5	<0,5
2-amino-4-nitrotoluène (2-ANT)	Métabolites du DNT		**16,3**	**4,33**	**120**
2-amino-6-nitrotoluène			**3,74**	**2,99**	**74,9**
3-amino-4-nitrotoluène (3-ANT)			**6,45**	**1,6**	**60,2**
2,4,6-trinitrophénol (acide picrique (*Mélinite*))	Explosif		<10	**1 570**	<10

Tableau 39 : Résultats analytiques des sols au point de détonation par OD de trois obus de la Première Guerre mondiale (2017) à Noire Fontaine (Vaudoncourt, département de la Meuse). Laboratoire Envilytix GmbH (Wiesbaden, Allemagne)..

2.2.4 Entonnoirs de pétardement du centre de destruction de munitions du ravin du Chaufour (Douaumont)

D'autres échantillonnages de sol de sites de pétardement ont été menés dans le cadre de cette recherche suivant le même protocole que celui décrit précédemment. Les sols de surface d'un entonnoir d'éclatement situé au Ravin du Chaufour, en plein cœur de la « zone rouge » de la forêt domaniale de Verdun, à deux pas de la tranchée des baïonnettes, dans le département de la Meuse, ont été collectés en août 2016. Là, un industriel de Bras-sur-Meuse, dénommé Ricome, fut mandaté par l'Etat pour y démolir dans l'entre-deux-guerres des engins de 1914-1918. L'activité reprit sur ce site vers 1955[1828] pour les engins du second conflit mondial avec le même industriel. Le site fut réinvesti ensuite pour y détruire dans les années 60 les REG de l'Armée américaine lors de son retrait de France suite à la retractation du pays de l'OTAN.

Les reconnaissances sur site montrèrent la présence de munitions correspondant à ces trois phases historiques (cf. Figure 278) jonchant le fond et les parois d'entonnoirs d'éclatement d'une dizaine de mètres de diamètre et de 3 à 4 mètres de profondeurs pour les plus grands. Elles provenaient de fourneaux d'éclatement n'ayant pas fonctionné correctement ou pas du tout. Deux échantillons composites de sol furent collectés dans un entonnoir d'explosion de 10 m de diamètre environ, constellé d'obus de mortier américains longs de M84 (OTAN). Les résultats analytiques sont rassemblés dans le Tableau 40 page suivante.

Projectiles d'artillerie et de mortiers de la Grande Guerre et de la Seconde Guerre mondiale.

Entonnoir d'éclatement jonché de projectiles de mortier américains M84 datant des années 60.

Figure 278 : Fourneaux de destruction par Open Detonation partiellement détonés. Site du Ravin du Chaufour, Douaumont (département de la Meuse). Aperçu photographique[1829].

A noter que ce site comprend par ailleurs un four de grillage (encore en place) d'obus de 20 mm ex-allemands de type *Solothurn*, antichar et antiaérien (*Flak*), des dépôts de résidus de grillage très riches en ETM (et en particulier en cadmium) et de deux fosses d'enfouissement de blocs fumigènes grillés d'obus américains de 90 et 105 mm, actuellement majoritairement constitués d'oxyde de zinc (ces blocs étaient initialement formés par du zinc métal Zn° finement divisé et de l'hexachlorocyclohexane). Ces blocs initialement enterrés furent mis à l'affleurement par l'affouillement de soues de sangliers.

[1828] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 12 Q 96. Le Lieutenant – Colonel Carbonnier. Chef de la Mission de Liaison 4th Log Com à Monsieur le Général, commandant la 6e Région militaire. Metz. Destruction de munitions non explosées trouvées dans la région de Verdun. Verdun, le 15 mai 1962.

[1829] Hubé, D. (2016, 2017).

Désignation d'échantillon	Unité	**Douaumont**	**Douaumont (2)**
Typologie	-	Entonnoir n°1 de pétardement chargé en munitions	Entonnoir n°2 de pétardement chargé en munitions
Mercure (Hg)	mg.kg^{-1} MS	<	0,41
Arsenic (As)		**190**	**170**
Cadmium (Cd)		10	13
Cuivre (Cu)		120	120
Étain (Sn)		56	25
Plomb (Pb)		130	48
Zinc (Zn)		**1 000**	**8 800**
2-Amino-4,6-dinitrotoluène		**0,17**	<0,05
4-Amino-2,6-dinitrotoluène		**1,21**	<0,05
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT)		**0,30**	**0,12**
3,5-Dinitroaniline		<0,05	<0,05
1,3-Dinitrobenzène		<0,05	<0,05
1,5-Dinitronaphtalène		<0,05	<0,05
1,8-Dinitronaphtalène		<0,05	<0,05
Hexogène (RDX)		**1,81**	<0,05
PETN (*Penthrite, Nitropenta*)		**5,68**	<0,05
Centralite 1		<0,05	<0,05
Diphénylamine		<0,05	<0,05

Tableau 40 : Résultats analytiques sur les échantillons de sol prélevés en dans les entonnoirs d'éclatement du site de destruction de munition du Ravin du Chaufour (Douaumont, forêt domaniale de Verdun, département de la Meuse) (Envilytix GmbH).

Les teneurs en zinc (Zn) et arsenic (As) apparaissent clairement anomaliques au regard du fond géochimique lorrain. Des traces d'explosifs anciens mais aussi plus récents (RDX, PTEN) sont à souligner, attestant d'opérations de destructions de REG postérieurs à 1914-1918. Les NAC sont essentiellement représentés par leurs métabolites (isomères des ADNT).

2.2.5 Terrain de pétardement implanté au droit de l'ancienne usine *C-Factory* à Trélon (

A Trélon, l'échantillonnage des sols dans le cadre de l'étude informelle des aires de brûlage du Parc Jeannette (usine *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils) (cf. Section 3e du présent manuscrit) m'ont conduit à rechercher des emplacements sur lesquels, en dehors de ces aires, les sols pouvaient être les plus représentatifs possibles de la qualité des sols de surface et du fond géochimique local. Ces échantillons « témoins » se sont en fait révélés pollués. Ils furent prélevés dans le terrain d'explosion du site, qui ne fut révélé qu'après coup par LiDAR (cf. Section 10h). Les sols présentaient au moment de l'échantillonnage des faciès singuliers, hétérogènes, bréchiques, d'aspect panaché et constellé de fragments métalliques. Les résultats des analyses de ces échantillons composites de sols, visant les métaux et métalloïdes, sont instructifs (cf. Tableau 41 page suivante).

Les échantillons montrent des teneurs en zinc (Zn), plomb (Pb), cuivre (Cu), étain (Sn) et cadmium (Cd) nettement anomaliques comparativement aux sols naturels locaux hors zones de destruction de munitions (terrain d'explosion et aires de brûlage). Ces métaux entrent typiquement dans la composition des corps des obus, des chargements (Sn, Pb), cartouches (Zn, Cu) ou encore fusées d'artillerie allemandes (Zn, Cu, Cd). Les teneurs en arsenic (As) et en mercure (Hg) apparaissent aussi par ailleurs légèrement anomaliques.

Echantillon	Localisation	Unité	Al	Hg	Pb	As	Zn	Cu	Cr	Sn	Cd
TPJ2-TEM	Parc Jeannette, Trélon	mg.kg^{-1} MS	38 000	**1,6**	**1 500**	**36**	**8 700**	**730**	-	**46**	**10**
TPJ2-TEM(2)			-	-	**5 300**	**33**	**14 000**	**1 700**	45	**220**	**14**
TPJ1-TEM2			31 000	0,7	87	**24**	**1 300**	**140**	-	5	2
TPJ1-TEM3			32 000	**1,8**	170	**23**	**590**	**160**	-	4	1
LBA-TEM1			21 000	0,2	170	15	160	24	-	15	0,5
LBA-TEM1(2)	Bois l'Abbé, Liessies		-	-	160	18	150	26	47	12	0,6
LBA-TEM2			20 000	<0,1	40	9	100	21	-	<2	<0,5
LBA-TEM2(2)			-	-	110	11	280	41	37	5	<0,5

Tableau 41 : Résultats analytiques d'échantillons de sol collecté au sein et aux abords du champ d'explosion de munitions ex-allemandes de l'usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (juillet 2014).

2.3. POLLUTIONS ET DESTRUCTIONS DE REG PAR OD EN FOURNEAUX. RETOUR D'EXPÉRIENCE DE BOSNIE HERZÉGOVINE ET DES USA.

L'impact sur les sols de certains métaux (Cd, Pb, Zn, Ni et Cu) suite aux destructions de munitions par éclatement a été étudié par Tomić et al., 2018 (a, b)[1830][1831] sur deux terrains de demolition en Bosnie Herzégovine. Les niveaux de pollution ont été évalués selon les critères de la réglementation de ce pays. Cette étude montre que les entonnoirs d'éclatement sont significativement impactés par le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et le zinc (Zn).

L'étude environnementale du terrain d'entraînement et d'exercice de Camp Edward (état du Massachusetts) a montré la présence dans les eaux souterraines de RDX (entrant dans la composition d'explosifs modernes), dont la principale source est une dépression servant à la destruction de munitions par brûlage et pétardement. Sur cette zone, des teneurs en RDX jusqu'à 14 000 mg.kg^{-1} furent mesurées[1832]. La Figure 279 montre un panache en ions perchlorate dans un aquifère à perméabilité élevée (galets, blocs morainiques) aux Etats-Unis, qui trouve sa source au niveau d'une vaste dépression au sein de laquelle furent opérées dans les années 70 jusqu'à la fin des années 80 des destructions d'engins pyrotechniques par pétardement (OD) et par brûlage (OB)[1833]. Des concentrations maximales de 5 µg. L^{-1} de ClO_4 ont été mesurées au sein de ce panache. Ces concentrations sont sans aucune commune mesure avec celles mesurées localement dans les eaux de boisson dans le quart nord-est de la France (nettement plus élevées).

[1830] Tešan Tomić, N., Smiljanić, S., Jović, M. et al. (2018). *Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines, and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit: Part 1—Pseudo-total Concentration. Water Air Soil Pollut* 229, 301 (2018).. https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0.

[1831] Tešan Tomić, N., Smiljanić, S., Jović, M. et al. (2018). *Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit; Part 2: Determination of Heavy Metal Fractions. Water Air Soil Pollut* 229, 303 (2018). https://doi.org/10.1007/s11270-018-3950-7.

[1832] *Ibid.*

[1833] Adilman, D.J., Curry, D., Clausen, J., and Abate, C. AMEC Earth and Environmental Inc. *Characterization of Perchlorate Plumes in a High Permeability Aquifer*.

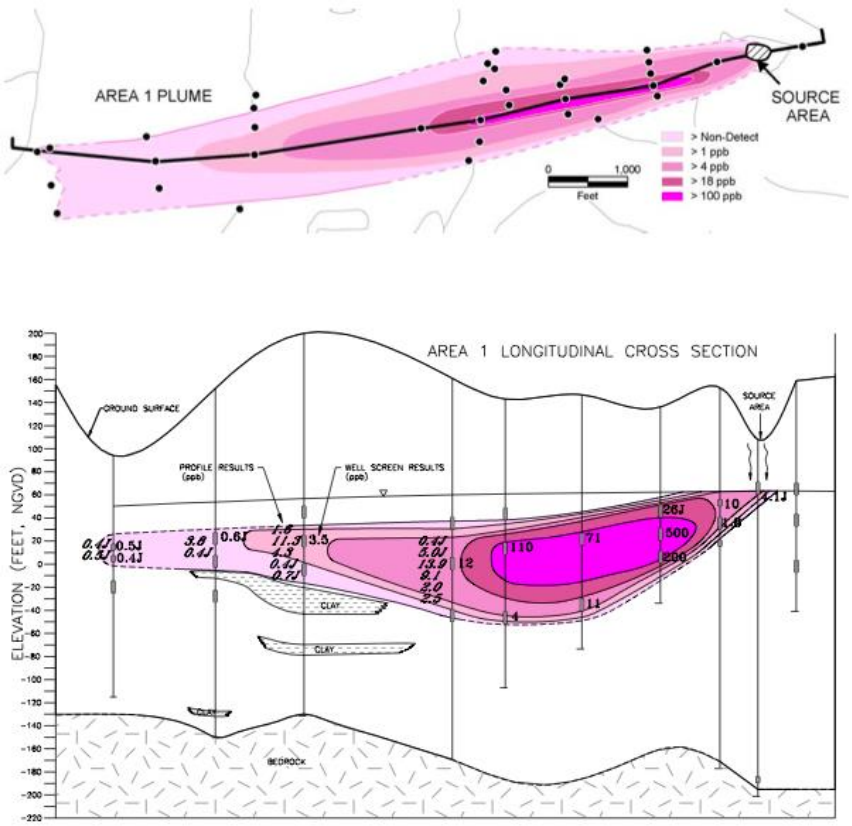


Figure 279: Panache d'ions perchlorate en lien avec une source de pollution ponctuelle formée par un entonnoir de destruction de munitions[1834].

2.4. CONCLUSION

En conclusion, le pétardement (OD) est une méthode simple, ancienne et radicale de neutralisation des fonctions militaires des REG, fondée sur le principe de la transmission par sympathie d'une détonation initiale d'un « donneur » à un ensemble de matériels explosibles (fourneaux). L'impact des activités de OD sur la qualité des terrains, sols et/ou eaux souterraines au droit et dans le proche environnement de points de détonation est évident au regard des retours d'expérience et des mesures originales exposés dans ce qui précède. La dégradation de la qualité des sols est le fait des métaux et métalloïdes (en particulier zinc (Zn), plomb (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), étain (Sn)) constituant les différents éléments du corps des projectiles (*casings*, fusée, ceinture, etc.) mais aussi de composés typiques des chargements (TNT, DNT, trinitrophénol, etc.) et de leurs sous-produits de transformation environnementale. La détonation par sympathie ne décompose donc pas l'intégralité des chargement des munitions visées par les destructions. En effet, nous avons vu dans la Section 1e du présent volet que ces détonations transmises s'apparentaient plus à une détonation partielle, de bas-ordre, qu'à une détonation totale, de haut-ordre. L'essentiel de la masse des résidus générés par les détonations est représentée par des fragments métalliques de différentes tailles, qui, contrairement aux chargements (représentant entre 1/5e et 1/10e de la masse totale des projectiles d'artillerie), ne se décompose pas au moment de l'explosion.

[1834] Adilman, D.J., Curry, D., Clausen, J., and Abate, C. *Characterization of Perchlorate Plumes in a High Permeability Aquifer*, *op. cit.*

.

Les mécanismes en jeu susceptibles d'être à l'origine de l'introduction dans l'environnement des éléments et composés identifiés ci-avant, lors des destructions par OD en fourneaux des matériels de guerre et matières explosibles, sont identifiés et décrits dans ce qui suit.

2.5. INTRODUCTION DE RÉSIDUS D'EXPLOSIFS DANS LES SOLS SUITE À LA DESTRUCTION PAR ÉCLATEMENT DE MUNITIONS ANCIENNES.

2.5.1 Production de particules d'imbrûlés par détonation de munitions éparses (*Blown-In-Place*)

Les opérations de destruction de Restes et Explosifs de Guerre par éclatement (*Open Detonation*) ont été et sont encore menées dans deux cas de figure :

1. Eclatement de projectiles isolés, épars, jugés intransportables ou douteux quant à la sureté de leur manipulation. Ces engins sont détruits sur place par détonation provoquée d'une puissante charge d'explosif brisant placée sur ou sur les flancs de l'engins à neutraliser (destruction par *Blown-In-Place* ou BIP).

2. L'éclatement de plusieurs projectiles rassemblés en tas (encore désignés par « fourneaux ») en une seule détonation. Ces fourneaux peuvent être composés de quelques engins à (selon les archives historiques) plusieurs dizaines de tonnes.

Pour ces deux situations, les recherches et mesures sur le terrain ont permis de proposer des valeurs de taux d'imbrûlés, ou de masses résiduelles correspondant à la masse des imbrûlés après détonation rapportée à la masse initiale du chargement. Les engins isolés sont détruits par BIP:

1. En détonant intégralement (détonation de haut-ordre); les chercheurs nord-américains identifient des particules d'imbrûlés et retiennent pour ce régime de détonation en BIP comme valeur haute du taux de ces résidus la valeur de 0,3%[1835] ;

2. En détonant partiellement (régime de déflagration, détonation de bas-ordre). Dans ce cas de figure, le taux de chargement résiduel non détoné s'établirait approximativement à 50% du chargement initial[1836]. Dans le cas d'une détonation de bas-ordre d'engins pétardés résultant sur la genèse de 2% de résidus, les recherches montrent que ces derniers sont composés de particules infra millimétriques comparables à celles observées consécutivement à des détonations de haut-ordre de munitions tirées. A contrario, lorsque les taux de résidus sont compris entre 20 et 40% l'essentiel de cette masse résiduelle consiste en des particules et fragments pluri millimétriques.

[1835] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations*? *op. cit.*

[1836] *Ibid.*

Il s'agit majoritairement de particules (< 2 mm), de fibres et de fragments fibreux (Radkte et al.,2002[1837]; Walsh et al., 2002[1838]; Taylor et al., 2004[1839] ; Walsh et al., 2004[1840]), associées à des restes d'enveloppes métalliques, à des éléments macroscopiques (*chunk*) et des particules microscopiques (*flakes*).

2.5.2 Production de particules et fragments d'imbrûlés lors de la détonation de fourneaux

Phénomène

Les conséquences des destructions par OD en fourneaux massifs en terme de libération de résidus restent méconnues, qu'il s'agisse d'opérations récentes modernes ou historiques. Une grande variété d'engins et matériels de guerre constituèrent ces fourneaux : principalement des engins explosifs d'artillerie de campagne, lourde, de tranchée de tout calibre, mais aussi incendiaires, fumigènes, à balles, bombes d'aviation, cartouches, gargousses, pétards et autres artifices (torches, signaux, etc.). Furent aussi pétardées des munitions spéciales à chargement chimique, parfois en fourneaux au design spécifique à ces engins, pour notamment limiter les risques de projection d'agents agressifs. Ces munitions à faible charge explosives étaient alors mélangées à des projectiles explosifs puissants pour garantir leur destruction. Le terrain de pétardement Clere & Schwander de Vaudoncourt et Loison est un exemple de terrain où furent liquidés dans les années 20 des REG explosifs, à balles et chimiques.

Les engins constituant les fourneaux peuvent suivre au même moment, lorsque la détonation est initiée, des régimes de détonation de haut-ordre (HOD) et bas-ordre (LOD) ou ne subir aucune détonation et se transformer en des équivalents d'UXOs. Dans le cas des LOD, la détonation du donneur fracasse le projectile dont le chargement explosif détone partiellement, projetant des fragments, parfois centimétriques, d'explosifs autour du point de détonation. Les images page suivante sont exceptionnelles (cf. Figure 280). Ils s'agit de captures d'écran d'un document cinématographique conservé à l'ECPAD (Établissement de communication et de production audiovisuelle de la Défense), montrant le fonctionnement et l'éclatement d'un fourneau de destruction (non daté et non localisé) de munitions de la Grande Guerre. L'explosion projetta des fragments de matières inflammables et énergétiques en combustion très lumineuse. Il s'agit d'explosifs n'ayant pas détoné mais étant entrés en combustion. Ces fragments d'explosifs s'éteignaient dans le cas présent, au regard de ce document, une fois déposés au sol. Les munitions éclatées dans ce fourneau ont suivi un régime de déflagration, une détonation de bas-orde avec dispersion dans les sols autour du point de détonation (de la charge d'éclatement), de résidus d'explosifs.

[1837] Radtke, C.W., D. Gianotto, and F.F. Roberto (2002). *Effects of particulate explosives on estimating contamination at a historical explosives testing area. Chemosphere,* 46: 3–9.

[1838] Walsh, M.E., Ramsey, C.A. and Jenkins T.F. (2002). *The effect of pArticle size reduction by grinding on sub-sampling variance of explosives residues in soil. Chemosphere*, 49: 1267–1273.

[1839] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.E., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit.*

[1840] Walsh, M.E., Collins, C.M., Hewitt, A.D., Walsh, M.R., Jenkins, T.F., Stark, J., Gelvin, A. B., Douglas, T., Perron, N., Lambert, D., Bailey, R., and Myers, K. (2004). *Range characterization studies at Donnelly training area, Alaska 2001 and 2002*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Technical Report ERDC/CRREL TR-04-5.

Figure 280 : Projections de fragments d'explosifs non détoné en combustion lors de l'éclatement d'un fourneau de destruction. Non daté. Non localisé[1841]*.*

Taux de production d'éléments imbrûlés issus du chargement

La fraction massique du chargement des engins réellement détruite par OD ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique investie sur ce sujet. Cette situation résulte (i) de la difficulté à établir les ratios entre les masses des chargements de munitions initialement présentes dans les fourneaux et les masses de chargement dispersées post-détonation, notamment du fait du caractère particulaire et fragmentaire des résidus d'explosifs dans les sols et la difficulté à établir un bilan massique, (ii) de la grande hétérogénéité des comportements des engins dans les fourneaux de pétardement lors des détonations. Les recherches de l'Administration de l'Environnement du Land de Bavière (LfU), basées sur la caractérisation des terrains de pétardement en Bavière, proposent des taux de masses résiduelles introduites dans les sols au droit et dans le proche environnement des entonnoirs de destruction de REG en fourneaux par OD[1842]. Le LfU considère en premier lieu les valeurs issues de la littérature nord-américaine et le taux de résidus provoqué par la détonation HOD de munitions tirées soit 0,003%. Cette valeur est estimée trop faible, les munitions des fourneaux d'éclatement suivant plutôt des régimes de détonation de bas-ordre connus pour laisser un taux de résidus plus élevé.

[1841] Arrêts sur image, extrait d'un document cinématographique conservé à l'ECPAD. VTS_01_3 14.18 A 586.

[1842] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit*.

Depuis les années 80, les spécialistes de la question aux USA considéraient un taux de 4 % encore cité dans la littérature spécialisée au début des années 2000. Ce pourcentage était trop élevé pour rendre compte des teneurs en résidus d'explosifs mesurés dans les terrains de pétardement post Seconde Guerre mondiale en Allemagne.

La valeur moyenne de résidus de 0,1 % (dans une fourchette de 0,01 et 1 %) de la charge explosive initialement contenue dans les munitions (représentant 10 % en poids du projectile) fut *in fine* retenue pour les terrains de démolition de liquidation des REG de la Seconde Guerre mondiale dans les études diligentées par le LfU[1843]. L'expérience montre que ces valeurs théoriques moyennes ne rendent pas compte de la grande diversité des situations et des conditions de détonation dans les fourneaux de destruction. Des taux d'imbrûlés excédant 50% furent en effet aussi constatés.

Par exemple, la destruction sur une terrain d'explosion de 1 000 tonnes de munitions (soit l'équivalent de 140 000 obus d'artillerie de campagne et environ 20 000 projectiles d'artillerie lourde), dont 1/7e de la masse serait formée par les chargement, soit 143 kg se décomposant par détonation à hauteur de 0,1% et 50%, se traduirait par l'introduction dans les sols d'un résiduel de respectivement 143 kilogrammes et plus de 71 tonnes, et 857 tonnes de métaux, si ces derniers n'ont pas été récupérés (cf. Tableau 42 suivant).

Taux résiduels de décomposition du chargement (%)	% chargement / masse des projectiles	Masses totales des fourneaux (Tonnes)	Masse des chargements (Tonnes)	Résiduels après détonation (Tonnes)	Résiduels du chargement après détonation (kg)	Résiduels des métaux après détonation (tonnes)
0,1%	14,3%	1 000	142,9	0,1	143	857
1 %	14,3%	1 000	142,9	1,4	1 429	857
50 %	14,3%	1 000	142,9	71,4	71 429	857

Tableau 42 : Simulation des fractions résiduelles des chargements après détonation de 1 000 tonnes de munitions.

Les terrains d'explosion au sein desquels de forts tonnages de munitions furent éliminés par OD peuvent donc avoir concentré des masses importantes de fragments métalliques et de composés entrant dans la constitution des chargements quels que soient les taux de décomposition des chargements à l'issue des détonations. Les tonnages des fourneaux sont rarement connus. Ils pouvaient être très élevés (par exemple la destruction de 10,5 tonnes de munitions anciennes, opérée le 23 juillet 1941 par Léon Berge à Vendin-le-Viel, département du Pas-de-Calais, fut pratiquée au moyen de 22 fourneaux, soit environ deux tonnes par fourneau)[1844].

[1843] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

[1844] Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras.

2.5.3 Munitions fracassées en absence de détonation des chargements

Les munitions peuvent aussi ne subir aucune détonation et être fracassées, se déformer par compression mécanique, entraînant une perte de l'intégrité du chargement et de son contenant ; les munitions découvertes sur les champs d'explosion de Vaudoncourt Loison et de Noire Fontaine (Vaudoncourt) dans le canton de Spincourt illustrent parfaitement le phénomène. Un film datant de janvier 1919, conservé aux Archives Nationales à Washington D.C.[1845] montre le pétardement in-situ par les artificiers de l'AEF, d'un des vastes dépôts ex-allemands de la voie stratégique de la Woëvre (vraisemblablement celui de Lissey dans la Meuse, renfermant 3 000 obus et 2 700 grenades). Les points de détonation étaient ensuite inspectés post-explosion pour juger des effets. Ces images montrent de nombreux engins de gros calibre, projetés, déformés. Des fragments d'ogive encore chargés d'explosifs sont exhibés. D'une manière générale, étaient conservées post-détonation les parties les plus solides des obus, à savoir le culot et la partie ogivale sur lesquelles l'explosif était encore souvent adhérant. Les munitions de petit calibre d'armes portatives, les charges propulsives et les munitions encartouchées n'étaient que très difficilement détruites par détonation. Les engins et fragments furent soit écrasés vers le fond et les parois des entonnoirs d'éclatement, pour ainsi dire « injectés » dans les sols par l'action mécanique de l'onde de choc des détonations, où être projetés au sein de l'entonnoir, retombant dans leur fond par gravité, ou au-delà des lèvres des cratères où ils constituèrent, détonation après détonation, une auréole de retombée, dénommée « zone de dispersion ».

2.5.4 Analyse critique des études nord-américains par LfU (2009)

Le taux de décomposition des chargements sont inconnus, mais vraisemblablement très variables d'un site de pétardement à l'autre, voire d'un fourneau à l'autre, selon la diversité des pratiques des artificiers, la nature et le tonnage des fourneaux. Les valeurs issues des recherches américaines résultent de détonations provoquées par des professionnels de la destruction de REG avec des méthodes et sur des projectiles modernes, en appliquant les règles de l'art et les bonnes pratiques actuelles en matière de savoir-faire d'artificiers (meilleures technologies disponibles). Il convient de rester prudent quant à leur exploitation et extrapolation directe à des pratiques historiques et notamment lorsque les munitions et REG furent pétardés en masse et en urgence dans des fourneaux de plusieurs tonnes. Il n'existe aucun retour d'expérience concernant les opérations de pétardement de REG datant de la Grande Guerre menées durant et postérieurement à la Première Guerre mondiale. L'étude allemande (LfU, 2009[1846]) souligne les limites des études américaines en les resituant dans le contexte historique des opérations de destruction massives des REG en Allemagne dans les années 40.

- D'abord, les masses des charges explosives initiant les détonations des fourneaux étaient insignifiantes par rapport aux masses à faire éclater, contrairement aux opérations de BIP décrites dans la littérature nord-américaine ; de là, la transmission par sympathie d'une détonation de haut-ordre était limitée, les fourneaux suivant généralement un régime de bas-ordre ou ne détonant pas du tout, l'énergie de l'éclatement était absorbée par l'écrasement mécanique des engins et/ou leur projection bien au-delà du point de détonation ; ce qui est décrit en Allemagne sur les terrains d'éclatement converge avec certaines observations relevées dans le cadre de cette recherche en France pour la sortie de la Première Guerre mondiale ;

[1845] National Archives, Washington D.C., number H-1485. Odnance salvage activities in the Meuse-Argonne sector.

[1846] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen Anhang 2.2 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA*, *op. cit.*

- Les engins non détonés furent aussi « injectés » par la pression de la détonation dans les sols encaissant au niveau des points d'explosion. Les détonations répétées provoquèrent des explosions « par sympathie » de ces engins enfouis, qui suivirent un régime de bas-ordre ;

- Les explosifs de la Seconde Guerre étaient coupés avec des sels. La qualité des chargements et des explosifs n'étaient pas optimales dans les conditions de production de guerre. On peut pressentir lors du fonctionnement de ces fourneaux anciens des vitesses de détonation bien moindres que celles générées par des explosifs répondants aux standards ;

- A la fin de la guerre, n'étaient disponibles pour composer les charges de destruction que des explosifs de piètre qualité, qui laissèrent beaucoup de résidus au moment de leur détonation et n'eurent qu'un effet limité sur les fourneaux ;

- Plus la proportion d'engins de petit calibre chargés d'explosifs était élevée plus la fraction de matériaux résiduels après détonation augmenta. Ainsi, certains projectiles, comme les projectiles de tranchée allemand *Taube* étaient réputés récalcitrants à la démolition par OD compte tenu de leur solidité. La présence de ces engins est fréquente dans les entonnoirs et auréoles de dispersion des champs d'explosion ayant liquidé des REG allemands (comme à Barenton-Bugny dans l'Aisne). Ils furent à l'origine de l'accident mortel du 1923 à Wintzenheim (département du Haut-Rhin) à l'emplacement d'un ancien champ d'explosion exploité par l'Armée française pour la destruction d'un stock ex-allemand (cf. Section 9h du présent manuscrit).

Les observations de terrain réalisées dans le cadre de la présente recherche ainsi que les indications historiques tirées des archives tendent à rapprocher cette situation post-Seconde Guerre mondiale à celle de la sortie de la Première Guerre mondiale, période durant laquelle les tonnages visés à démolir étaient considérables (cf. Section 12h du présent manuscrit).

2.5.5 Conclusion

Les résultats des recherches publiées et menées en Amérique du Nord sont précieux mais ne permettent pas de connaître précisément, par analogie, les taux de matériaux résiduels après détonation de fourneaux de destruction de la Première Guerre mondiale, les conditions opératoires suivant lesquelles ces pétardements de masse furent effectués s'écartant notablement de celles à l'origine des valeurs nord-américaines. Les recherches historiques exposées dans le premier volet de ce manuscrit montrent qu'avant 1920, les autorités militaires procédèrent au pétardement de quantités considérables (bien qu'inconnues) de matériels et matières explosifs, des opérations placées sous le sceau de l'urgence avec en corollaire la nécéssité de la rapidité de leur exécution. Un faisceau d'informations laisse présager des taux d'imbrûlés et d'échecs de détonation dans les fourneaux de pétardement durant la guerre et surtout post-conflit bien supérieurs à ceux relevés en Allemagne pour des destructions post Seconde Guerre mondiale et en Amérique du Nord sur des munitions modernes non explosées collectées et rassemblées sur les champs de tir actifs. Les études nord-américaine, à l'instar de celles menées en Allemagne, donnent à voir les mécanismes en jeu et la grande hétérogénéité des situations et conditions de fonctionnement des fourneaux de destruction se traduisant par des rendements de destructions très fluctuants. Ces taux de chargement résiduel seraient très variables d'un fourneau de pétardement à l'autre, de l'ordre du pourcent lorsqu'il y a détonation de bas-ordre à plusieurs dizaines de pourcent lorsque les munitions sont fracassées en absence de détonation.

3. Organisation des entonnoirs de démolition par OD et des terrains d'explosion

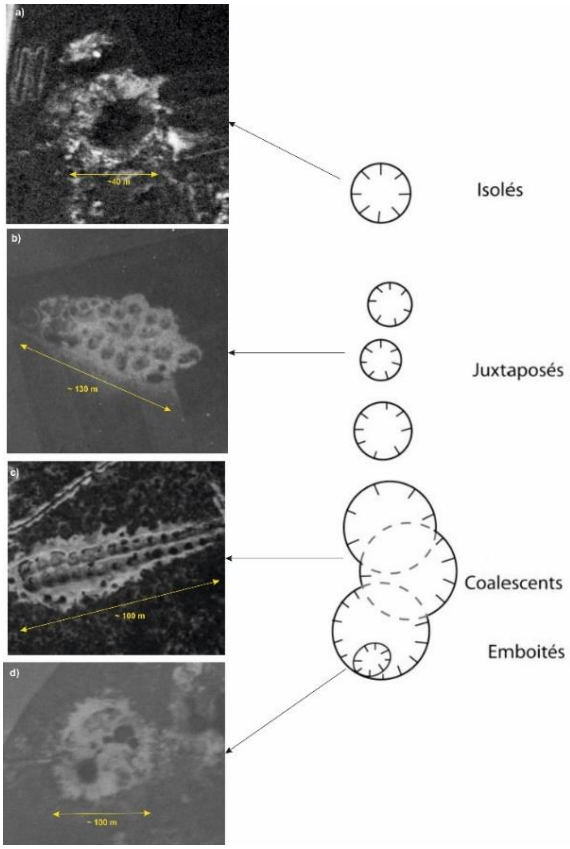
3.1. GENESE DES ENTONNOIRS ET POLYGONES DE DESTRUCTION

La Figure 285 montre, en plan, l'organisation générale d'un entonnoir d'éclatement comme ceux constituant les terrains d'explosion. La Figure 286 illustre la formation, l'organisation (en profil), puis le remblaiement d'un entonnoir d'éclatement.

La détonation de masse par OD génère une onde de choc qui va se traduire par (i) la propagation de la détonation aux projectiles proches voisins dans un fourneau par sympathie, (ii) des effets mécaniques par la fragmentation de certaines munitions et une déstructuration des terrains alentours (par compression puis détente). Les horizons des sols sont brassés, fragmentés et prennent (pour les sols à matrices argileuses) des faciès brèchiques, hétérogènes. Lewis et al. (2013)[1847] démontrent que les détonations conduiraient à une augmentation locale de la conductivité hydraulique (d'au moins un ordre de grandeur pour une munition moderne d'artillerie de 105 mm détonée vers 2,5 m de profondeur) des terrains sollicités par l'onde de choc. Elle s'accompagne d'une onde thermique qui peut affecter la structure des terrains formant l'encaissant des entonnoirs d'explosion. Ces matériaux subissent des modifications structurales, texturales et chimiques importantes et irréversibles, comme par exemple la coloration (rouge à ocre) (rubéfaction) due à la présence et à la transformation des oxydes de fer comme cela a pu être reconnu lors des sondages à la pelle mécanique dans les entonnoirs de pétardement investigués par le LfU (2009) (cf. Figure 287). L'onde de choc se traduit aussi par un écrasement de la base des fourneaux d'éclatement et l'enfoncement dans les sols de munitions ou fragments de munitions. La base des entonnoirs constitue en général la partie la plus polluée des terrains d'explosion du fait de ce phénomène mais aussi du fait de l'accumulation au point le plus bas des matériaux retombés et non éjectés au-dessus des lèvres des entonnoirs. La dépression circulaire induite, en s'approfondissant par des détonations répétées, forme un entonnoir d'éclatement (encore appelé « explosoir »). Le diamètre typique de tels entonnoirs s'établit généralement entre 10 et 25 m pour une profondeur de l'ordre de 2 à 5 m. De plus grands entonnoirs peuvent se former lorsque les masses nettes d'explosifs augmentent (démolition d'engins de gros calibre).

Ces dimensions distinguent les entonnoirs de démolition des cratères d'impact provoqués par un tir d'artillerie. La grande densité de fragments métalliques contenus dans les terrains des parois des entonnoirs d'éclatement et dans son pourtour, les différencient des cratères d'explosion de mines (souterraines). Les dimensions (diamètre, profondeur) et la géométrie des entonnoirs étaient fortement dépendantes (i) de la puissance des détonations, (ii) de la masse des fourneaux, (iii) de la nature des terrains sur lesquels étaient opérées les détonations. Les détonations sur des terrains durs et cohérents, comme les calcaires, marquent très peu la topographie. Les sols argileux avaient aussi tendance à amortir les ondes de chocs, limitant ainsi les projections de matériaux. Enfin, le pétardement fut aussi réalisé dans des dépressions préexistantes comme les carrières, ou de vastes cratères de mines ou encore dans d'anciens forts et blockhaus sans nécessairement marquer la morphologie du secteur. Ces destructions de munitions furent aussi une opportunité de détruire les fortifications bétonnées.

[1847] Lewis, J., Burman, J., Edlund, C., Simonsson, S., Berglind, R., Leffler, P., Qvarfort, U., Thiboutot, S., Amp, G. (2013). *The effect of subsurface military detonations on vadose zone hydraulic conductivity, contaminant transport and aquifer recharge. Journal of Contamina Hydrology*. 146 (2013) 8 -15.



Les détonations étaient généralement poursuivies dans un même entonnoir jusqu'à ce que sa profondeur se traduise par des difficultés d'accès des artificiers à son point bas (pour l'établissement des fourneaux) ou que ce fond soit envahi par les eaux (de pluie ou par la mise à l'affleurement de la nappe phréatique). Ces entonnoirs étaient isolés ou regroupés et formaient alors généralement des « terrains d'explosion » (TE) ou « polygones de démolition » lorsque les éclatements étaient opérés dans plusieurs entonnoirs proches voisins, en parallèle ou tour à tour, ou encore lorsqu'ils étaient poursuivis à proximité des entonnoirs rendus impraticables. Ces entonnoirs étaient juxtaposés, parfois alignés en rangées selon un axe coïncidant souvent avec le tracé des voies de chemin de fer desservant le champ d'explosion depuis le ou les dépôts de REG à démolir.

Enfin, les entonnoirs d'explosion pouvaient aussi être coalescents voire emboîtés (cf. Figure 281 ci-contre).

Figure 281 : Typologie des entonnoirs d'explosion. a) Vaste entonnoir isolé de Juniville (département des Ardennes)[1848], b) Champ d'explosion (champ 2) d'entonnoirs juxtaposés de Barenton-Bugny (département de l'Aisne)[1849], c) Entonnoirs coalescents à Berry-au-Bac à l'est de la Cote 108 (département de l'Aisne)[1850] et d) Entonnoirs emboîtés à Barenton-Bugny (champ 1) (département de l'Aisne)[1851].

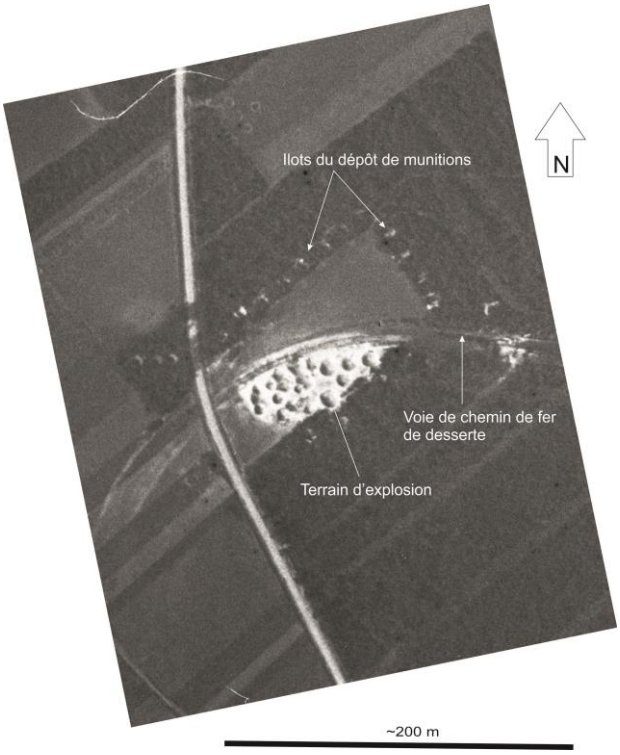
Des merlons étaient parfois dressés autour des champs d'explosion pour prévenir la propagation des éclats et du souffle et protéger les artificiers en charge de ces opérations.

[1848] Extrait du cliché IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-09-09__C2611-0141_1929_NP7_1240.

[1849] Extrait du cliché IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-04-22__C2709-0071_1929_NP1R19_0001.

[1850] Extrait du cliché IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-09-05__C2711-0101_1929_NP7_2124.

[1851] Extrait du cliché IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-04-21__C2709-0061_1929_NP1R18_0040 (1).



Les chantiers de destruction de munitions par OD pouvaient comporter plusieurs champs d'explosion. Leur nombre et leur position répondaient à des exigences sécuritaires et d'efficacité opératoire : il fallait limiter les manipulations de matériels lourds et dangereux en se plaçant au plus près des dépôts à liquider en exploitant le réseau de voie de chemin de fer existants ou à créer pour ces circonstances (cf. Figure 282 ci-contre). Les archives consultées dans le cadre de cette recherche montrent aussi que des cratères préexistants, liés aux faits de guerre, étaient aussi recherchés par les artificiers pour opérer les destructions car les dégâts occasionnés par les détonations et la remise en état des sols pouvaient alors être imputés à l'Etat (et non à l'armée) au titre des dommages de guerre. Certaines destructions ne pouvaient être exécutées dans des conditions telles que les intérêts et les biens des civils furent préservés.

Figure 282 : Terrain d'explosion de Saint-Erme-Outre-et-Ramecourt (département de l'Aisne). Photographie aérienne de 1922. Extrait[1852].

Des plaintes et protestations émanant de civils furent nombreuses en réaction aux dégâts occasionnés aux habitations (vitres brisées, toitures soufflées, etc.), aux nappes télégraphiques (télégraphie par le sol (TPS), inventée en 1917), et aux voies de chemin de fer.

Les champs d'explosion pouvaient atteindre des dimensions considérables, de plus d'un hectare, rassemblant plusieurs centaines d'entonnoirs. Citons ici par exemple les champs d'explosion de Fampoux (département du Pas-de-Calais) (cf. Figure 284) exploités dans l'entre-deux-guerres mais aussi durant la première moitié de la Seconde Guerre mondiale par Léon Berge sous contrat avec l'Etat. Le LfU (2009)[1853] propose une classification des champs d'explosion selon leurs dimensions, étroitement liées aux tonnages démolis.

- Catégorie S – tonnage détruit jusqu'à 800 tonnes ;
- Catégorie M – tonnage détruit jusqu'à 2 000 tonnes
- Catégorie L – tonnage détruit jusqu'à 8 000 tonnes
- Catégorie XL – tonnage détruit supérieur à 8 000 tonnes.

[1852] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1922-08-21__C2810-0041_1922_NP9_0030.

[1853] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit*

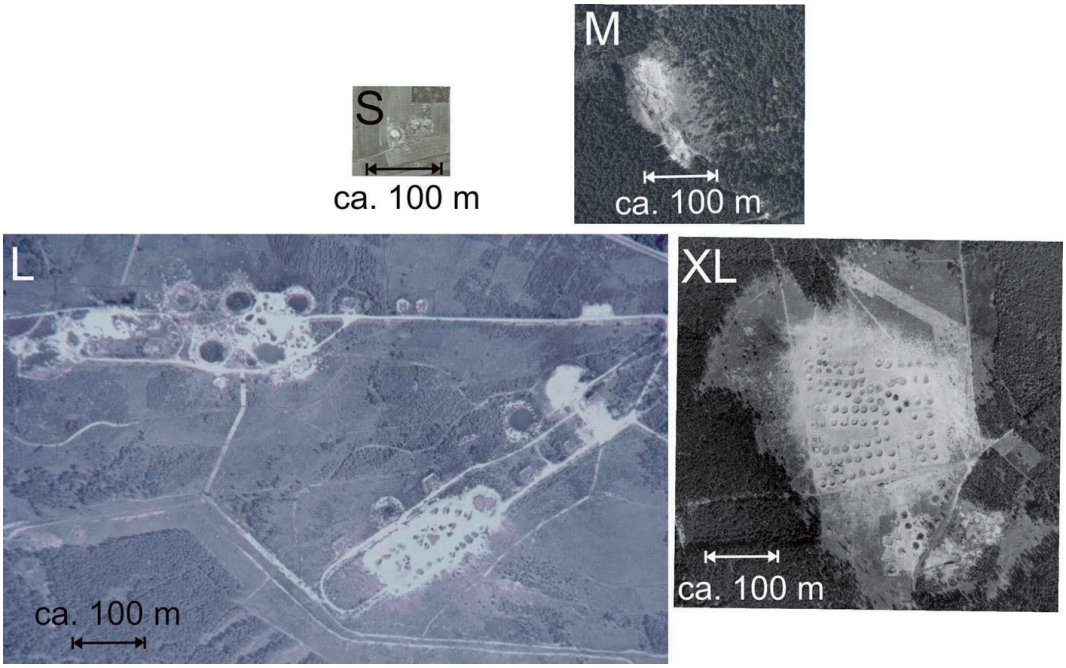


Figure 283 : Catégories de champs d'explosion selon les dimensions et le tonnage détruit proposé par le LfU du Land de Bavière[1854].

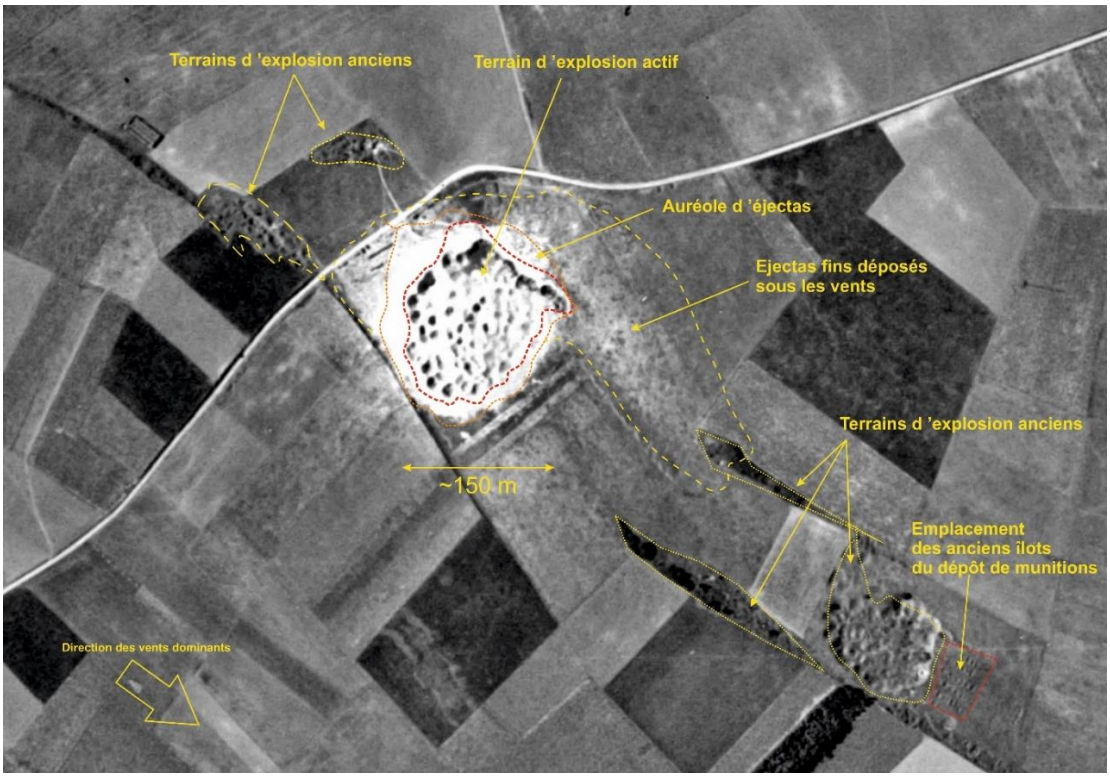


Figure 284[1855] Champs d'explosion de Fampoux et Monchy-le-Preux (département du Pas-de-Calais) (1947). Ce vaste terrain d'explosion a été exploité jusqu'en 1941 par l'industriel Léon Berge pour la démolition des engins de 1914-1918. Il aurait été exploité postérieurement possiblement pour éliminer les REG de la Seconde Guerre mondiale. Cette photographie aérienne montre clairement le champ actif tout comme les marques des anciennes activités de l'entre-deux-guerres. A noter la dispersion des projections selon la direction des vents dominants.

[1854] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

[1855] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1947-10-03__C2406-0081_1947_F2406-2506_0065 (2)

Les entonnoirs de détonation sont ourlés de matériaux éjectés par-dessus des lèvres des entonnoirs. La portée des projections dépend de la puissance de la détonation (et donc de la quantité nette d'explosif qui a fonctionné) et de la profondeur de l'entonnoir. En première approximation, les éjectas dessinent une auréole large d'environ 20 m à partir des lèvres du cratère, mais peut être plus étendue pour les très grands entonnoirs. Les matériaux éjectés formant l'auréole de projection se répartissent uniformément autour des entonnoirs d'éclatement ou de façon anisotrope, lorsque les explosions sont effectuées par grands vents, sous la direction des vents dominants. Un bel exemple d'auréole influencée par les vents est celui du vaste terrain d'explosion de Fampoux (cf. Figure 284). La cubature des matériaux éjectés s'établirait aux alentours de 150-200 m^3, pouvant atteindre les 1 000 à 2 000 m^3 pour les plus grands. Dans le cas du terrain d'explosion de Noire Fontaine à Vaudoncourt (cf. Figure 170), l'auréole de projection est large de 30 à 40 m et épaisse au regard du cliché aérien ancien datant de 1922. Lorsque les explosions sont répétées en un même point, les lèvres de l'entonnoir se relèvent par la construction d'un monticule formé par l'accumulation d'éjectas pouvant atteindre un mètre d'épaisseur. L'épaisseur de la couche d'éjectas décroit avec l'éloignement à la bordure de l'entonnoir. A partir d'une certaine profondeur de l'entonnoir l'essentiel des matériaux éjectés retombe dans la dépression (matériaux désignés par *Fall-back*).

La zone de dispersion (*Streugebiet*) (cf. Figure 285) est celle au sein de laquelle les engins qui n'ont pas été démolis par la détonation de masse ont été projetés au-dessus des lèvres des entonnoirs puis dispersés, plus au moins intacts, par l'onde de choc. Les distances de projection dépendent (i) de la masse nette d'explosifs qui entra effectivement en détonation à chaque explosion et de la charge de destruction apposée sur chaque fourneau, (ii) du calibre des munitions à détruire, (iii) de la profondeur des fourneaux dans les entonnoirs de pétardement et (iiii) de la morphologie des alentours des entonnoirs.

Les terrains d'explosion furent abandonnés en l'état post-exploitation, généralement lorsque situés dans un environnement forestier, ou, en environnement agricole, remblayés, soit par des matériaux rapportés, soit par les matériaux éjectés présent dans l'auréole de projection. Dans ce dernier cas, ces matériaux peuvent être très hétérogènes et comporter des munitions, fragments de munitions et de leur chargement. Certains entonnoirs servirent aussi de dépotoirs (cf. Figure 287). Lorsqu'ils ont été abandonnés, les entonnoirs subirent la même évolution naturelle que les cratères d'impact et ceux ouverts par les charges de la guerre de mines. Le colluvionnement (entrainement de particules fines par les eaux de ruissellement sur les parois) contribua progressivement au comblement d'une partie des entonnoirs qui, en accumulant aussi l'humidité et la matière organique, furent rapidement envahis par la végétation arbustive.

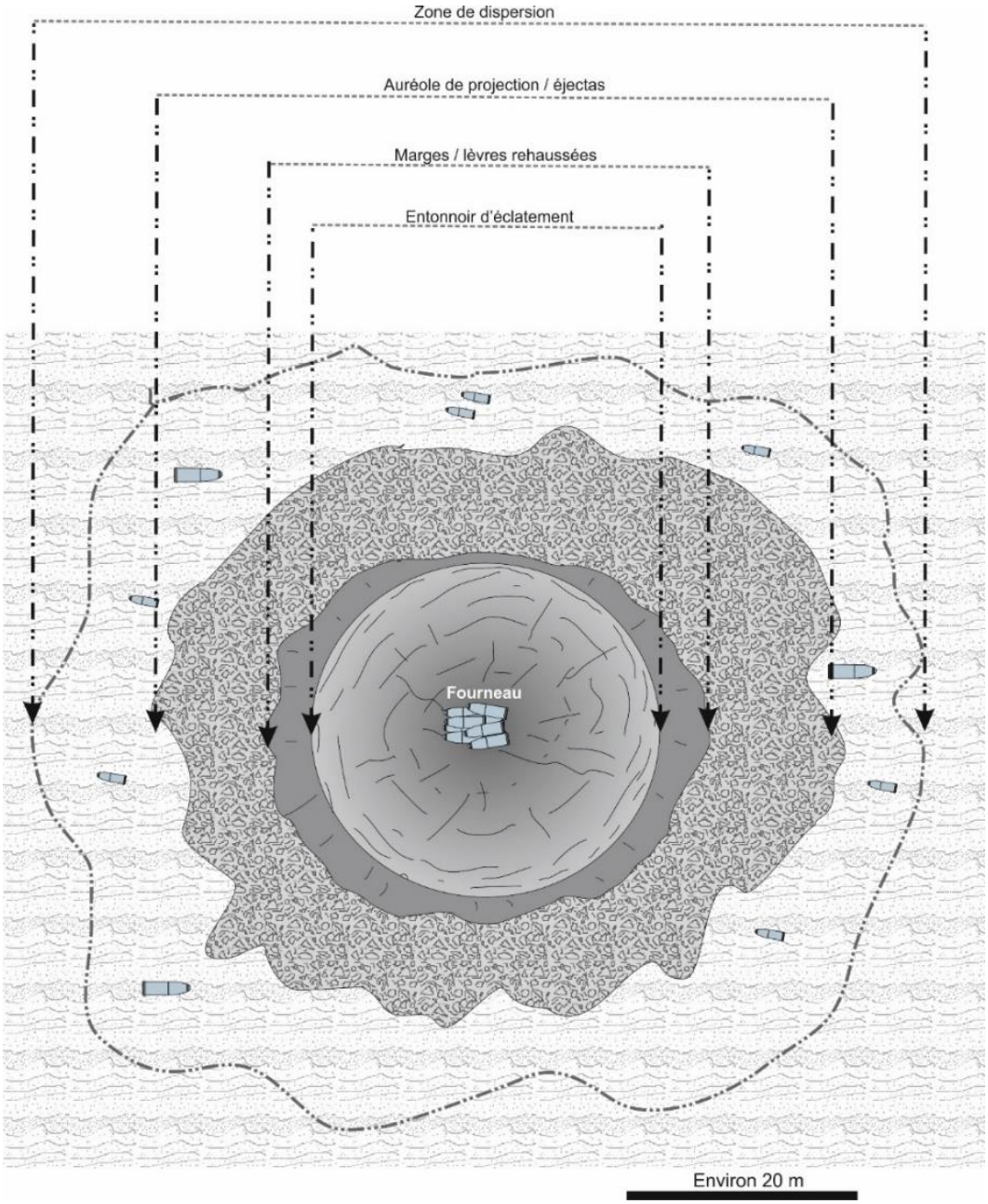


Figure 285 : Organisation d'un entonnoir d'éclatement et distribution des Restes Explosifs de Guerre (plan)[1856].

[1856] Hubé, D. (2023) inspiré de Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil, op. cit.*

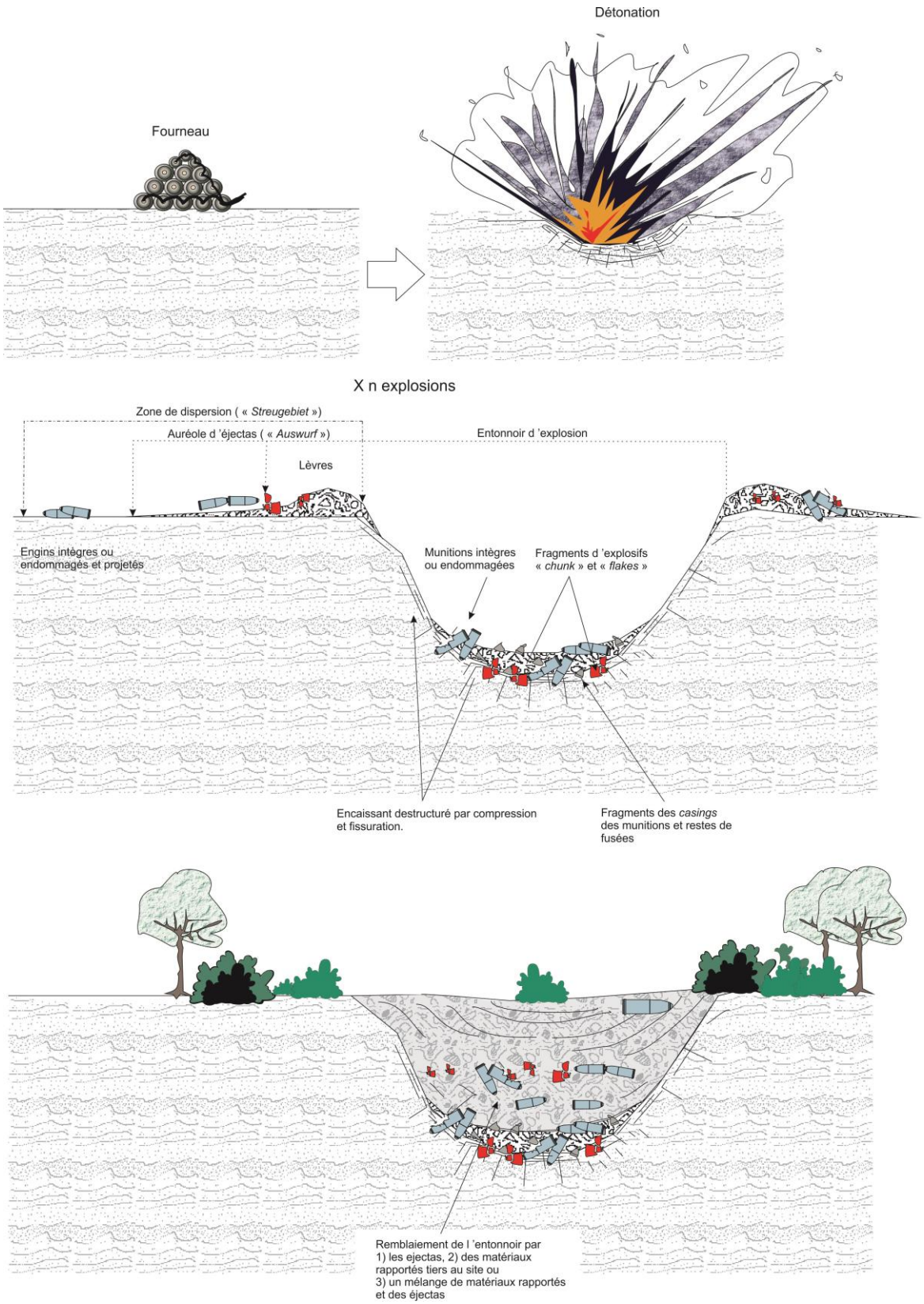


Figure 286 : Organisation d'un entonnoir d'éclatement et distribution des Restes Explosifs de Guerre (coupes schématiques séquencées)[1857].

[1857] Hubé, D. (2023), inspiré de Schwendner (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil, op. cit.*

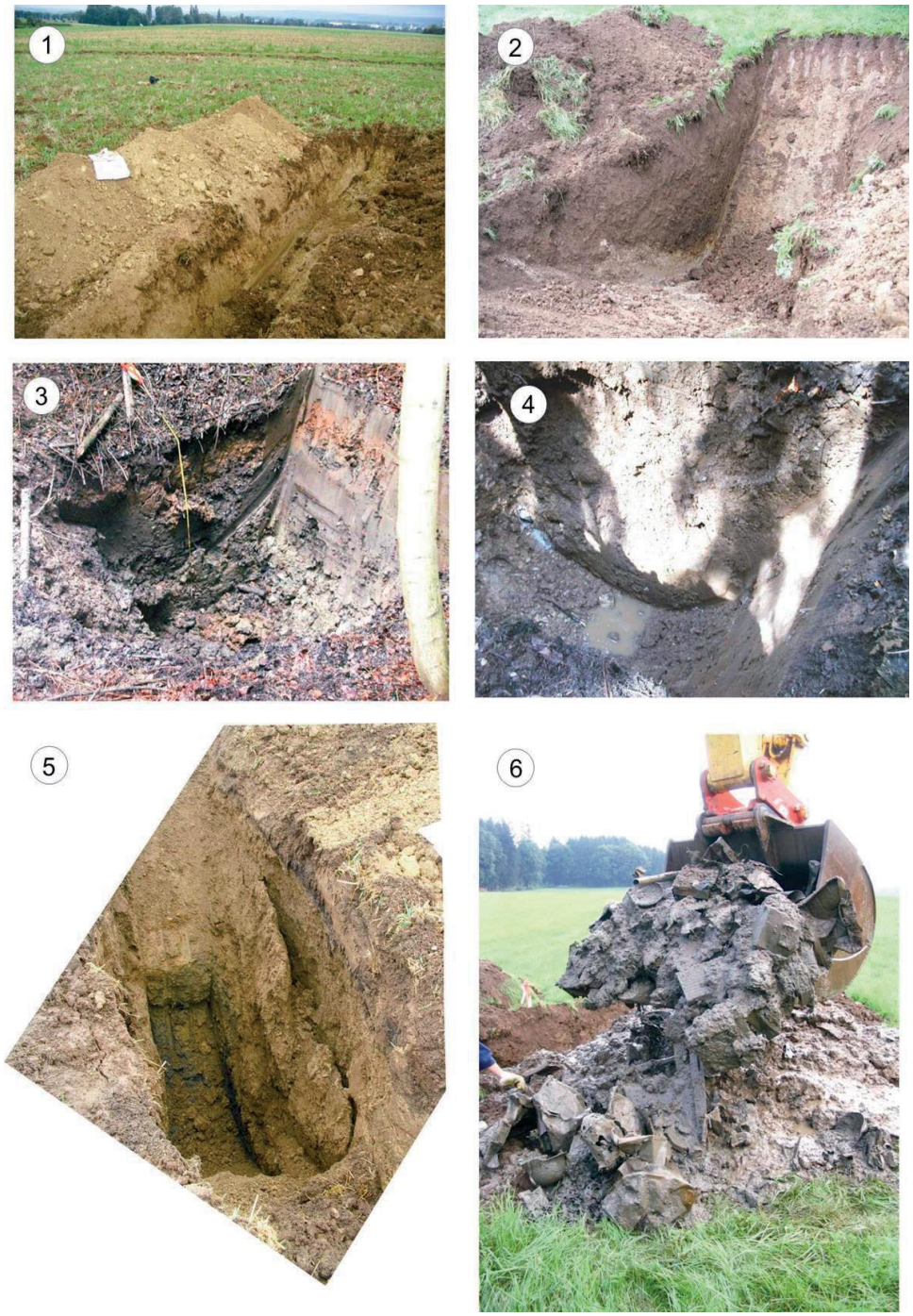


Figure 287 : Matériaux de comblement d'entonnoirs d'éclatement. Aperçus photographiques. 1) Ce sondage ne recoupe aucun entonnoir et révèle la nature et la structure du sol naturel. 2) Une différence de coloration apparaît en paroi du sondage indiquant la bordure d'un entonnoir remblayé par des matériaux non naturels. 3) Les matériaux de comblement renferment ici une forte proportion de matière organique en décomposition (feuilles, racines et branchages, etc.) ; il s'agit de matériaux rapportés externes au site qui ne présentent aucune pollution. 4) Entonnoir intégralement comblé par les matériaux issus de l'auréole de projection, au fond duquel se sont accumulées les eaux d'infiltration polluées par le TNT et ses métabolites. 5) Entonnoir intégralement comblé par les matériaux issus de l'auréole de projection. Le délitement cruciforme des parois est typique des remblais des entonnoirs. 6) Cet entonnoir d'éclatement a servi de dépotoir en réceptionnant des déchets provenant de la Wehrmacht ; ils ont été mélangés avec des matériaux pollués (par les explosifs) provenant de l'auréole de projection[1858].

[1858] Extrait de Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, op. cit.

4. Etude de cas. L'exemple des champs d'explosion du complexe de désobusage Clere & Schwander de Vaudoncourt Loison et de Noire Fontaine (Vaudoncourt) dans le canton de Spincourt (Meuse).

4.1. DECOUVERTE FORTUITE DE POLLUTION HISTORIQUES ET GENESE D'UNE SITUATION DE CRISE

On rappelle en préambule que près de 1 500 000 engins à chargement chimique et au moins 300 000 munitions explosives provenant de Belgique et de la 2e Région militaire furent rassemblées sur et dans le proche environnement de l'ancien dépôt de munitions et de matériel ex-allemand situé entre la ferme de Rampont (à Muzeray) et Spincourt, dans le nord meusien (cf. Section 7h du volet historique). Une entreprise privée, du nom de Clere & Schwander, fut mandatée par le Ministère des Finances (Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks) en septembre 1919 pour liquider par des moyens industriels ce vaste dépôt devenu dangereux et anxiogène. Le détail de l'historique de la liquidation des dépôts du canton de Spincourt est rassemblé dans Hubé (2017)[1859].

En résumé, le complexe de désobusage comprenait trois entités (cf. Figure 288 et Figure 290) : (i) le terrain d'explosion de Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt) utilisé jusqu'en 1920 (sur environ 200 m x 175 m) contre lequel vinrent s'adosser, une fois les destructions par OD achevées, les ateliers de démontage et de brûlage d'obus (60 m x 200 m) visibles sur des photos aériennes de 1922, (ii) l'usine principale de la Ferme de Rampont (commune de Muzeray) installée (sur environ 320 m x 280 m) à l'emplacement du dépôt ex-allemand, qui comprenait des ateliers de désamorçage, de vidage (après trépanation), de neutralisation (fours et tours de lavage), et des tranchées de brûlage, et (iii) le terrain d'éclatement de Vaudoncourt Loison (s'étendant sur environ 400 m x 50 m) au sein duquel furent pétardées avant 1924 de grandes quantités d'obus chimiques et explosifs, sans volonté de récupération systématique de matières. Ces trois entités étaient reliées entre elles par des voies de chemin de fer à écartement normal, pour l'acheminement des munitions et l'expédition des matières de récupération.

A noter que deux autres terrains de destruction de munitions par OD ont été identifiés, en lien avec la liquidation du vaste dépôt de munitions du canton de Spincourt (i) un petit terrain d'une centaine de mètres de long établi le long de la voie ferrée reliant le dépôt de Spincourt (au nord) de celui de Vaudoncourt Loison (au sud), à 500 à l'est de Noire Fontaine (cf. Figure 289) et (ii) le terrain d'explosion du Bois de Warphemont à Muzeray, à 1 400 m à l'ouest-nord-ouest du village (hors cadre de la Figure). Le premier terrain d'explosion a été recoupé par un fossé agricole dont le creusement exhuma de nombreux projectiles (cf. Figure 289). Ces engins furent signalés au service du Déminage de Metz afin d'être évacués.

[1859] Hubé, D. (2017). *Industrial-scale destruction of old chemical ammunition near Verdun: a forgotten chapter of the Great War, First World War Studies.*

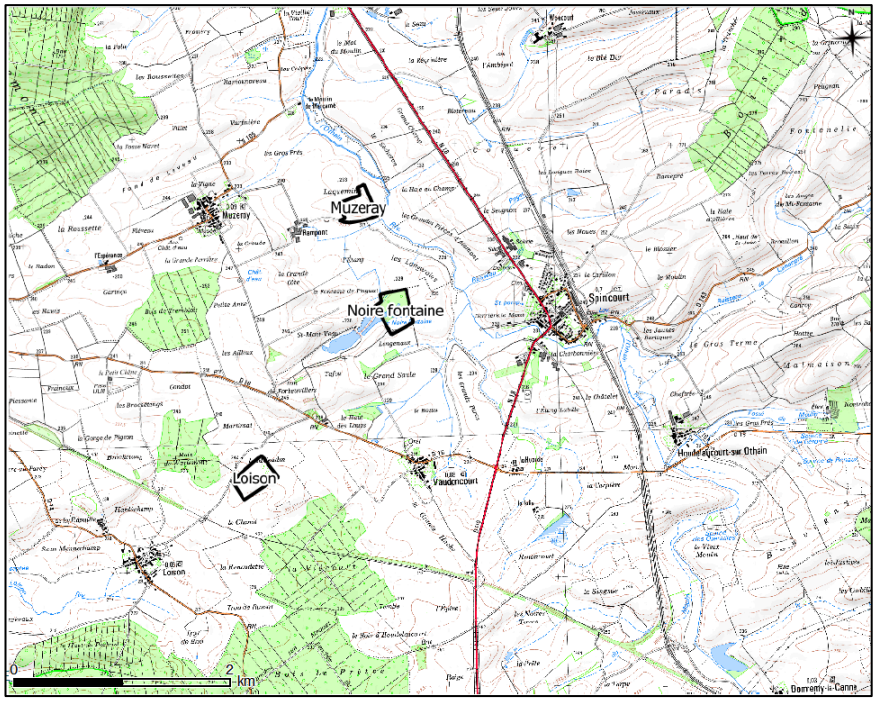


Figure 288 : Localisation des trois principales entités du complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (nord du département de la Meuse).

Figure 289 : Projectiles découverts dans le fossé agricole recoupant le champ d'explosion secondaire de Spincourt (source : Hubé, D., juillet 2016). Vue aérienne de 1922 du terrain d'explosion (photo en bas à gauche, largeur de la prise de vue, environ 130 m)[1860].

[1860] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001.

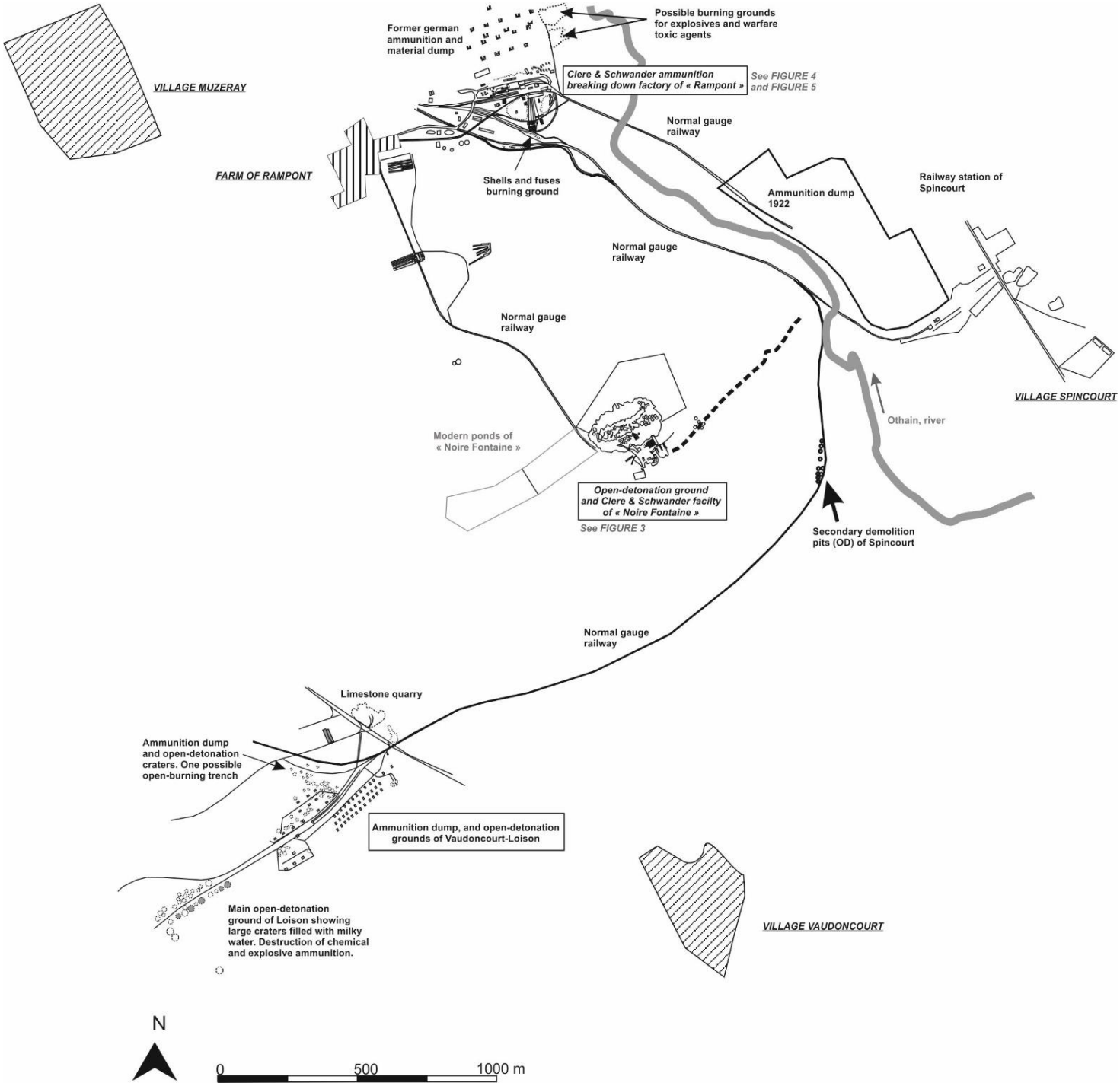


Figure 290 : Organisation du complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (département de la Meuse). Au centre le terrain d'explosion de Noire Fontaine et au sud celui de Vaudoncourt Loison. Extrait de Hubé (2017)[1861].

[1861] Hubé, D. (2017). *Industrial-scale destruction of old chemical ammunition near Verdun: a forgotten chapter of the Great War,* op cit.

L'ensemble des données et informations environnementales en possession du BRGM sur le complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt ont été acquises à la faveur des diagnostics de la qualité des milieux (sols, eaux de surface, sédiments, eaux souterraines, denrées alimentaires végétales (blé, orge, maïs) et animales (lait et viande bovine)) réalisés pour alimenter et conduire une évaluation des risques suite à la découverte fortuite, en janvier 2015, de pollutions sévères des sols agricoles. Ces études environnementales détaillées font l'objet du rapport référencé « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ».

Cette découverte fortuite de pollution dans un environnement sensibles (usages agricoles des sols, proximité des eaux souterraines et superficielles vulnérables) amena l'autorité préfectorale à prendre immédiatement des mesures conservatoires radicales afin de protéger les populations, de les soustraire aux risques d'exposition à des composés dangereux (toxiques, cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques), dans l'attente (i) d'analyses contradictoires, (ii) des résultats des études (diagnostics de la qualité des milieux (sols, eaux, sédiments, denrées alimentaires animales et végétales)), et (iii) de l'évaluation des risques selon la méthode d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM)). Ainsi, 110 hectares de parcelles agricoles (blé, orge, maïs, pâtures), répartis sur les trois entités formant le complexe de désobusage furent mises sous séquestre (gel des exploitations et destruction des récoltes) par arrêté préfectoral en juillet 2015 sur la base de l'étude historique. Seule la pêche de loisir « *no-kill* » fut autorisées dans les étangs de Noire Fontaine. Les Ministères en charge de l'environnement (études environnementales et analyses des risques déléguées au BRGM) et de l'agriculture (diagnostic agronomique et analyses des parties comestibles des cultures et bovins), ainsi que l'Agence de l'Eau Rhin Meuse (AERM), l'ARS Meuse furent mobilisés sur les plans financiers (dédommagement des agriculteurs impactés, études, etc.) et techniques dans un climat de crise (médiatisation nationale, choc puis émergence d'un malaise dans la communauté agricole locale, etc.).

4.2. TERRAINS D'EXPLOSION DE VAUDONCOURT LOISON

4.2.1 Description

Les vastes entonnoirs (estimés à 15 à 20 m de diamètre, pour une vingtaine d'unités) du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison, sont visibles sur le cliché aérien ancien de 1922 (cf. Figure 293). Il s'agissait d'entonnoirs juxtaposés, alignés en deux rangées sur 150 à 200 m (nord-est / sud-est) de part et d'autre d'une voie de chemin de fer. Le cliché de 1922 montre qu'ils étaient emplis d'eau, parfois d'aspect laiteux, ce qui semble être concordant avec les descriptifs du champ d'explosion recueillis dans les archives. Dans les correspondances conservées aux archives départementales de la Meuse (site de Bar-le-Duc, sous la cote 10 R 82), on lit que le Capitaine Mandra, commandant le Parc d'Artillerie Annexe de Verdun, informa le 22 octobre 1924 le Chef des Services Techniques de la Reconstitution que « *en ce qui concerne le champ d'explosion de Vaudoncourt, un danger supplémentaire se présente : ce terrain ayant servi de lieu de destruction pour de nombreux obus spéciaux (toxiques) il est hors de doutes que le sol a été copieusement arrosé de liquides toxiques, ypérite, arsines, phosgène. Les vastes entonnoirs sont pleins d'eau saturée de ces gaz, aussi il est à craindre que les ouvriers récupérateurs subissent de graves brûlures […]. Au vue d'éviter ces accidents et afin de dégager la responsabilité de l'Etat, le champ d'explosion a été entouré d'une clôture (fils de fer barbelés), des pancartes apposées sur le terrain avertissant qu'il y a un danger de mort à pénétrer sur le champ d'explosion* ». Ce document indique enfin que l'exploitation du champ d'explosion aurait cessé depuis le 1er octobre 1924.

Le préfet de la Meuse en interdit l'accès, compte tenu du degré de pollution des sols et des eaux par des composés potentiellement agressifs, des risques encourus si des personnels venaient à évoluer dans cet environnement et ne pas engager la responsabilité de l'Etat en cas d'accident. Malgré cela, des documents historiques attestent que des opérations de récupérations illicites, accompagnées d'accidents, eurent lieu à Vaudoncourt dans l'entre-deux-guerres.

Ces entonnoirs auraient encore été ouverts à la fin des années 40 selon un témoignage recueilli auprès d'un habitant de Vaudoncourt « *nous allions jouer dans ces cratères de toutes les couleurs. Nous recueillions les fioles en verre [ndlr : fioles d'arsine d'obus à Croix bleue allemands] et nous nous en servions à l'école comme encrier* ». Progressivement, avec le colluvionnement, les dépressions se comblèrent partiellement naturellement, et furent envahies par des taillis. L'emplacement des entonnoirs était encore visible dans le paysage dans les années 80 (cf. Figure 293). Actuellement, ces dépressions ont été intégralement remblayées (probablement par des matériaux locaux), puis le terrain fut nivelé, labouré et mis en exploitation pour la culture du blé.

4.2.2 Reconnaissances préliminaires de terrain (janvier 2015)

Une première reconnaissance visuelle de terrain a été effectuée en janvier 2015, alors que le champ venait d'être labouré. L'emplacement de certains entonnoirs était encore visible dans le paysage par (i) la teinte légèrement plus sombre des sols et surtout par la présence en leur sein d'une grande densité de fragments métalliques de munitions et (ii) la mise à l'affleurement uniquement à l'emplacement des entonnoirs de plaquettes calcaires attribuées au Bathonien supérieur (faciès Dalle d'Etain).

Le champ d'explosion est implanté sur le plan géologique sur les argiles grises du callovo-oxfordien (Argiles de la Woëvre) qui affleurent sur cette zone avec une faible épaisseur de l'ordre de 3 à 4 m (estimatif). Les détonations répétées formant les entonnoirs auraient donc percé cette couche d'argile et expulsé depuis le fond des entonnoirs, vers le haut et en surface, du calcaire situé sous cette dernière. Les entonnoirs auraient donc une profondeur au moins équivalente à l'épaisseur locale de la couche d'argile. Des projectiles furent mis à l'affleurement à la faveur des labours puis amassés par l'agriculteur au pied des pylônes électriques basse tension qui jalonnent le champ (cf. Figure 291). Ces engins étaient d'origine allemandes et issus d'un dépôt de munitions (engins à ceintures lisses, non tirées). Ils étaient soit intègres, soit brisés, sectionnés (en montrant leur chargement d'explosif ou de billes de plomb), ou encore déformés (ovalisation) attestant des fortes contraintes mécaniques qu'ils subirent par les détonations en fourneaux.

Les munitions découvertes étaient toutes encore dotées de leurs ceintures de cuivre, métal noble à forte valeur-ajoutée, prioritairement recherché par les récupérateurs. Il n'y aurait pas eu sur ce site de neutralisation de REG avec une volonté délibérée de récupération systématique des métaux constitutifs des engins de guerre, bien qu'il soit mentionné dans les archives que des récupérateurs auraient été à l'œuvre sur ce terrain d'explosion.

Ces projectiles « polluent » les remblais ayant comblé les vastes entonnoirs. Il s'agit possiblement de matériaux et d'engins formant initialement les zones de dispersion et de projection.

Ces engins découverts en janvier 2015 furent évacués par le centre du Déminage (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC). Ministère de l'Intérieur) de Metz (soit 1,2 tonnes de munitions). D'autres engins furent mis à l'affleurement à la faveur du labour de l'automne 2016.

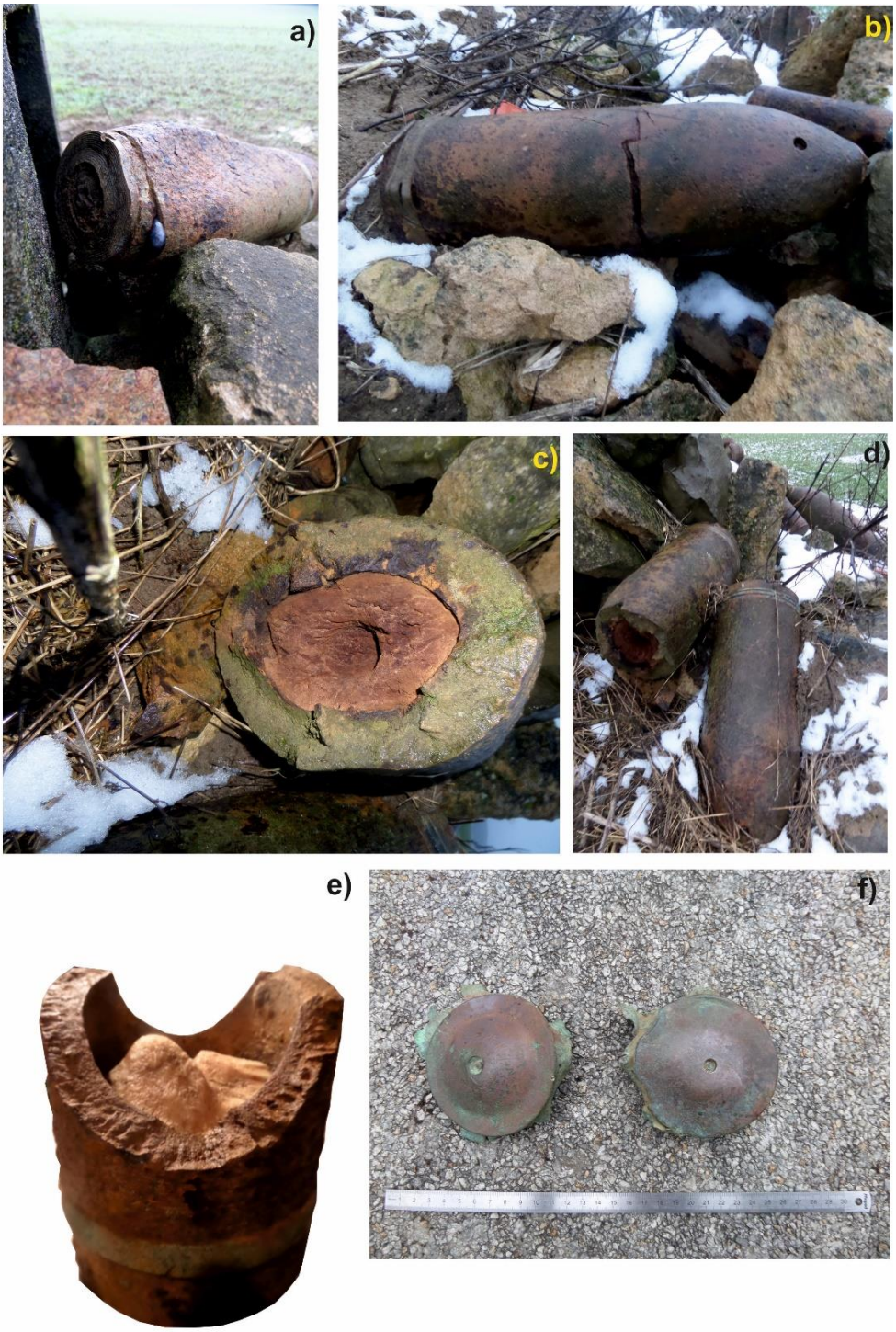


Figure 291 : Projectiles et fragments de projectiles observés au droit du terrain d'éclatement Clere & Schwander de Loison Vaudoncourt, canton de Spincourt (département de la Meuse)[1862](2015) . a) Un obus dont la partie ogivale exsude une matière noire goudronneuse. Possiblement une résine et un obus Shrapnel, b) un obus explosif de 210 mm fracturé, c) cet obus, possiblement de rupture vue l'épaisseur de ses parois, a été fracturé par les détonation. Il expose son contenu de TNT à l'observateur mais aussi à l'environnement ; le logement de la gaine d'éclatement dans le TNT est parfaitement visible. A noter le profil ovalisé de l'engin attestant de contraintes d'écrasement qu'il subit lors de la détonation du fourneau, d) obus fracturés et déformés, e) un culot d'obus allemand de 105 mm encore chargé d'explosif (dinitrobenzène). Sa ceintutre lisse montre qu'il provient d'un dépôt et qu'il n'a pas été tiré, f) culot de deux cartouches éclatées d'obus allemands d'artillerie de campagne de 77 mm.

[1862] Hubé, D. (2015).

4.2.3 Campagne de prospection géomagnétique (septembre 2015)

Afin de localiser plus précisément les entonnoirs d'OD, dans la perspective de caractériser leur contenu, une campagne de prospection géomagnétique fut entreprise par le BRGM sur ce site. La technique consiste à venir mesurer depuis la surface les perturbations locales du champ magnétique terrestre induites par la présence dans les sols et en profondeur d'objets métalliques magnétiques (en acier et fonte aciérée). Cette prospection de gradient magnétique vertical fut réalisée en septembre 2015 par une équipe spécialisée de géophysiciens du BRGM. Pour cela, cinq gradiomètres magnétiques espacés de 50 cm, furent montés en ligne sur un charriot amagnétique dont la position était repérée par un GPS différentiel (DGPS, base et mobile) (cf. Figure 292). Une partie du terrain d'explosion fut dans un premier temps balayée. Le dispositif de mesure ne permet pas d'apprécier la qualité de la cartographie magnétique en direct et en temps réel, l'exploration a été poursuivie en plusieurs phases au regard des acquisitions et résultats à l'avancement.

Figure 292 : Charriot de prospection géomagnétique. Aperçu photographique (BRGM, 2016).

Les protocoles opératoires sont décrits et détaillés dans « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». La prospection géomagnétique effectuée au droit de l'ancien champ de démolition de Vaudoncourt Loison a permis d'identifier deux types d'anomalies magnétiques significatives (en gris foncé à noir sur la carte de gradient magnétique vertical de la Figure 293) :

- <u>Une anomalie linéaire</u> s'étendant du sud-ouest au nord-est de la zone couverte par les mesures ; ce linéament coïncide avec une empreinte topographique visible sur la photographie aérienne infrarouge de 1987. Le cliché aérien ancien de 1922 montre qu'il s'agit de la voie ferrée ayant desservi le terrain d'explosion et séparant les deux linéaments d'entonnoirs isolés parallèles. Son caractère magnétique est très probablement lié au ballast formé de laitier de haut-fourneau riche en fer métal ;

- Deux alignements d'anomalies quasi-circulaires et massives de 10 à 15 mètres de diamètres sont visibles, de part et d'autres de l'ancienne voie ferrée. Le cliché aérien ancien de 1922 montre que ces anomalies coïncident avec les vastes entonnoirs d'explosion en eau. La trace de ces entonnoirs isolés et alignés est encore visible dans le paysage sur les photos aériennes de 1987. Le caractère magnétique des matériaux ayant été utilisés pour remblayer ces dépressions est lié à l'occurrence de nombreux débris métalliques ferreux et de munitions mêlés aux matériaux de remblaiement, comme l'attestent les nombreuses découvertes d'engins de guerre sur ce terrain, mis à l'affleurement à la faveur des labours.

Les entonnoirs accueillent donc des matériaux riches en fragments de munitions et munitions magnétiques probablement dans le même état que ceux et celles mises à l'affleurement à la faveur des labours. Ils constituent des zones de pollution concentrées (par les composés et éléments constitutifs des munitions et de leur chargement) susceptibles de dégrader la qualité des eaux souterraines (nappe phréatique de la Dalle d'Etain) compte tenu de la perforation par ces entonnoirs de la couche argileuse callovo-oxfordienne de protection.

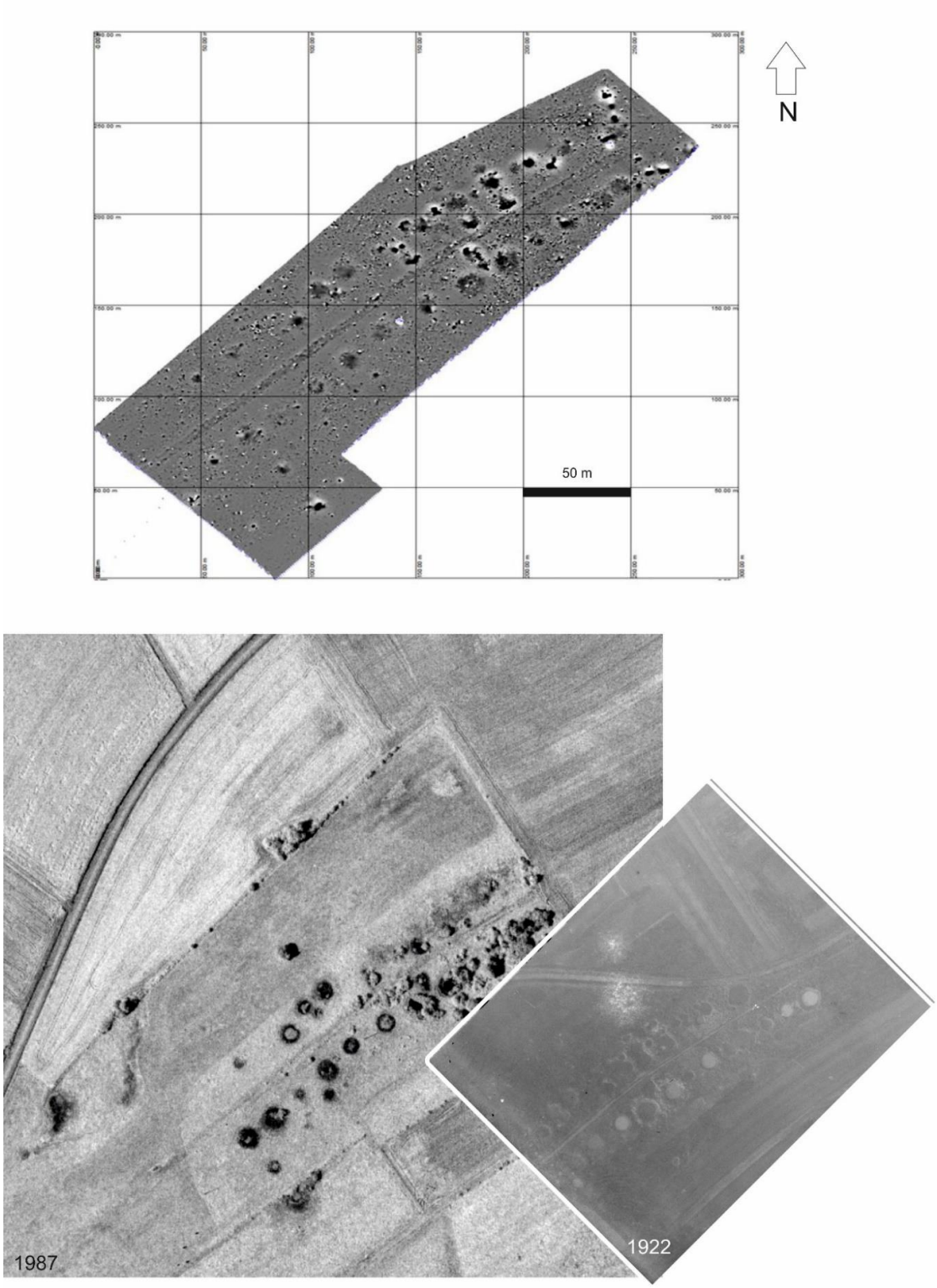


Figure 293 : Cartographie géomagnétique du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison (canton de Spincourt, département de la Meuse) de septembre 2015[1863] et aperçus orthophotographiques de 1922[1864] et 1987[1865].

[1863] Extrait de Hubé, D., Bâlon, P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final.* BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019.

[1864] Extrait du cliché IGN CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0021.

[1865] Extrait du cliché IGN C3110-0023_1987_IFN54-55_0574.

4.2.4 Diagnostic des sols de surface

Echantillonnage des sols de surface au droit du champ d'explosion (2015)

Concernant la connaissance de l'éventuelle pollution des sols de surface (hauteur du labour [0-40 cm]), deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en 2015 :

- Campagne exploratoire n°1 de janvier 2015 : cinq échantillons composites ont été collectés au niveau des zones présentant des indices organoleptiques de pollution (sols noircis constellés de fragments de REG). L'objectif de cette campagne était (i) de confirmer la présence de pollution suggérée par les indices organoleptiques de pollution, et (ii) d'identifier en première approche les cortèges de substances en présence, afin d'orienter ensuite un programme analytique plus ciblé, appliqué aux campagnes d'échantillonnage et d'analyses cartographiques plus étendues. L'échantillonnage a été réalisé sur une surface correspondant aux connaissances historiques. Les composés entrant dans les formulations des poudres et explosifs, toxiques de guerre typiques de la Grande Guerre et leurs sous-produits de transformation environnementale ont été recherchés de façon différée au laboratoire (Envilytix GmbH) selon le protocole par extraction à l'eau (lixiviation) préconisé par LfU (2009) ;

- Campagne exploratoire n°2, complémentaire, de juillet 2015 : quatre échantillons composites ont été constitués pour l'analyse différée au laboratoire des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), des PCDD & PCDF (PolyChloro-p-DibenzoDioxines et PolyChloroDibenzoFuranes) (un échantillon) et des métaux et métalloïdes (As, Cu, Cd, Sn, Hg, Pb, Zn). HAP et PCDD & PCDF sont des composés n'entrant pas dans les formulations des explosifs mais peuvent être générés par la combustion et la décomposition thermique d'hydrocarbures comme ceux présents dans les explosifs. L'objectif était de compléter le panel analytique de la campagne n°1 et de vérifier la présence ou non de pollution sur deux autres zones suspectes. Deux échantillons ont été prélevés au sein du champ d'explosion, deux autres échantillons provenant des terres agricoles situées dans l'auréole de projection autour du terrain d'éclatement.

Résultats analytiques

Les résultats analytiques obtenus sur les échantillons de sols de surface collectés au droit du terrain d'éclatement en janvier 2015 sont consignés dans le Tableau 43 pour les métaux (Cd, As, Cd, Pb) et métalloïdes (As) (par le laboratoire Wessling) et le Tableau 44 pour les composés organiques (par le laboratoire Envilytix GmbH).

Elément	Unité	VAU - 01	VAU - 02	VAU - 03	VAU - 04
Zinc (Zn)	$mg.kg^{-1}$ MS	210	140	110	75
Arsenic (As)		25	22	23	22
Cadmium (Cd)		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Plomb (Pb)		32	25	27	19

Tableau 43 : Résultats analytiques sur les échantillons de sols de surface collectés au droit du terrain d'éclatement de Vaudoncourt Loison (janvier 2015). Métaux. (laboratoire Wessling).

Les teneurs en métaux s'inscrivent dans les gammes de teneurs du fond géochimique local et ne mettent pas en évidence de dérive de la qualité des sols par rapport aux sols locaux non influencés par le terrain d'explosion.

En ce qui concerne les composés organiques entrant dans la composition des explosifs et toxiques de guerre, et leurs sous-produits de dégradation environnementale, seul l'échantillon VAU-1, collecté à proximité du pylône au pied duquel 1,2 tonnes de munitions étaient entassées, montre des traces d'isomères de nitroaniline, de dinitronaphtalène et du 1,3,8-trinitronaphtalène (à hauteur de 28,4 µg. L^{-1} dans l'éluât produit au contact d'un kilogramme de sol brut). Ces composés entraient dans la composition des explosifs des obus d'artillerie allemands de la Première Guerre mondiale.

Des HAP et des amino-nitronaphtalènes (métabolites de dégradation des nitronaphtalènes) ont été détectés par les deux *screenings* de recherche des liaisons organiques réalisés (en CPG et HPLC). Des traces de HAP (essentiellement du pyrène et du fluoranthène) (∑ 16 HAP (US EPA) = 72 $mg.kg^{-1}$ MS) et de dioxines et furanes chlorées (∑PCDD + PCDF = 310 $ng.kg^{-1}$ MS) avec une très large prédominance des furanes) ont été détectées en juillet 2015 sur un échantillon provenant de l'emplacement d'un cratère d'explosion. Les points d'échantillonnage de juillet 2015, pour le contrôle des teneurs en métaux, HAP, dioxines (PCDD) et furanes (PCDF) chlorées, coïncident peu ou prou avec ceux de janvier 2015 (VAU-01 à VAU-04). Aucune trace de toxique de guerre ou d'adjuvants à ces agents n'a été détectée.

Au regard des résultats (faible pollution à l'échelle très locale) des campagnes de janvier et juillet 2015, et de ceux obtenus sur les épis de blé provenant de ce champ (montrant l'absence de pollution des parties comestibles des plants de blé), l'autorité préfectorale leva la mise sous séquestre en 2015, il fut décidé de ne pas poursuivre les investigations des sols de surface pour l'usage agricole.

Le nombre d'échantillons de sol soumis à l'analyse est trop réduit pour réellement rendre compte de l'état des sols eu égard aux opérations de destructions de munitions sur ce site.

Paramètre	Unité	VAU-01	VAU-02	VAU-03	VAU-04	VAU-05
		27/01/2015				
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
4-Amino-2,6-dinitrotoluène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
4-Amino-2-nitrotoluène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
3,5-Dinitroaniline	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,4-Dinitrotoluène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,6-Dinitrotoluène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,3,5-Trinitrobenzène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,4,6-Trinitrotoluène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,2-Dinitrobenzène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,3-Dinitrobenzène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2-Nitroaniline	µg.L^{-1}	**1,42**	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
3-Nitroaniline		**1,20**	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1-Nitronaphthalène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2-Nitronaphthalène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,3-Dinitronaphthalène	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,5-Dinitronaphthalène		**2,78**	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,8-Dinitronaphthalène		**16,1**	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,3,5-Trinitronaphtalène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,3,8-Trinitronaphtalène		**28,4**	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
1,4,5-Trinitronaphtalène		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Acide 2-amino-4,6-dinitrobenzoïque	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Acide 4-amino-2,6-dinitrobenzoïque		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Acide 2,4-dinitrobenzoïque		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Acide 2,6-dinitrobenzoïque		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2-Nitrophénol	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
3-Nitrophénol		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
4-Nitrophénol		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,4-Dinitrophénol		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,6-Dinitrophénol		< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
2,4,6-Trinitrophénol	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque	µg.L^{-1}	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50

Paramètre	Unité	VAU-01	VAU-02	VAU-03	VAU-04	VAU-05
Acide Diphénylarsinique	µg.L^{-1}	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Triphénylarsine	mg.kg^{-1} MS	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
1,4-Dithiane	mg.kg^{-1} MS	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
1,4-Oxathiane		< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
1-Oxa-4,5-dithiépane		< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
1,2,5-Trithiépane		< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Chlorobenzène		< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Matière sèche	%	75,8	71,2	74,8	73,0	77,9
Perte en humidité		24,2	28,8	25,2	27,0	22,1
GC/MS Screening	qualitative	–	–	–	–	**HAP**
HPLC-DAD Screening	qualitative	1-Amino-5-nitro-naphthalène	–	–	–	–

	Explosifs (molécules mères)
	Métabolites et sous-produits de transformation environnementale des molécules d'explosifs
	Sous-produits de transformation du *Clark* (chlorure de diphénylarsine)
	Impuretés des explosifs, intermédiaires de synthèse
	Impuretés et solvant de l'*Ypérite*

Tableau 44 : Résultats analytiques sur les échantillons de sol de surface prélevés au droit du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison (janvier 2015). Composés énergétiques, toxiques de guerre et sous produits de transformation (Envilytix GmbH).

4.2.5 Investiger en profondeur et caractériser les matériaux comblant les entonnoirs ?

La question de la caractérisation des matériaux remblayant les entonnoirs se posa à l'issue du diagnostic des sols de surface. Sa réalisation se heurta à deux écueils.

Cette opération exigeait la réalisation de sondages pour permettre les observations visuelles et l'échantillonnage. Pour des raisons de sécurité, les sondages devaient être réalisés à la pelle mécanique (pour avoir un visuel sur les terrains en train d'être sondés et leur contenu), limitant la profondeur d'investigation à au maximum 4 m (pour des profondeurs d'entonnoirs de plus de 6-7 m), dans des remblais par nature extrêmement hétérogènes. La réalisation d'un nombre limité de sondages, pénétrant que partiellement les entonnoirs aux remplissages extrêmement hétérogènes, dont la nature pouvait aussi varier d'un entonnoir à l'autre, n'offraient pas de garanties quant à leur représentativité.

Par ailleurs, l'exécution de ces sondages pouvait s'avérer dangereuse (forte probabilité de découvertes d'engins de guerre dans des états de conservation douteux). Pour ces raisons de bénéfices / risques, aucune investigation pénétrative n'a été entreprise sur ce site (contrairement aux sites des usines et ateliers de neutralisation des munitions de Rampont (à Muzeray) et Noire Fontaine (à Vaudoncourt). On rappelle que l'objectif premier du diagnostic des sols était de vérifier la compatibilité ou non de la qualité des sols de surface (hauteur du labour) avec ses usages agricoles pour lever ou non les mises sous séquestres et non de caractériser de façon exhaustive l'empreinte sur les sols et les eaux de l'ancien terrain d'explosion, qui interessent la recherche.

4.2.6 Caractérisation de la qualité des eaux souterraines

Forage et pose d'un piézomètre à Loison (Janvier 2019)

La principale voie de transfert des composés présents dans les matériaux formant remblais dans les entonnoirs d'explosion est celle de leur dissolution par infiltration des eaux météoriques, puis leur migration jusqu'aux eaux souterraines, représentées ici par la nappe phréatique de la Dalle d'Etain. Il n'existe au droit et aux abords du terrain d'explosion (i) aucun point d'accès à cette nappe (puits, captage, source), (ii) aucun usage des eaux souterraines. Par ailleurs, les écoulements des eaux souterraines pour l'aquifère de la Dalle d'Etain étaient méconnus. Le seul point de résurgence des eaux de cette nappe pouvant faire l'objet d'un usage sont les eaux de l'ancien lavoir communal de Loison (d'indice national 01363X0001/HY), situé à 2 km au sud-ouest du terrain d'explosion. Les eaux du lavoir (échantillon LOI-LAVOIR) ont été échantillonnées les 25/08/2016 et 30/10/2017 et n'ont révélé aucune anomalie particulière à l'exception, pour l'échantillon d'août 2016, de traces de 2,4,6-trinitrotoluène à hauteur de 1,12 $\mu g.L^{-1}$. Le bassin versant de cette source, d'extension et de contours incertains, inclut possiblement tout ou partie du champ d'explosion.

Ainsi, pour lever le doute sur l'impact ou non du champ d'explosion sur la qualité des eaux souterraines, la décision fut prise de poser à minima un piézomètre de reconnaissance au plus près du champ d'explosion en considérant (i) les fortes contraintes techniques d'accès (en plein champ), de maîtrise foncière (refus ou autorisation par les exploitants et/ou propriétaires des parcelles, de pénétrer et d'installer un ouvrage) et (ii) l'usage agricole actuel des terrains. Un seul ouvrage pu être implanté, dont la situation en terme de représentativité de l'influence du champ d'explosion sur la qualité des eaux de la nappe de la Dalle d'Etain n'est pas optimale, l'ouvrage en question étant positionné à l'amont immédiat (au nord) des premiers entonnoirs d'éclatement.

Un piézomètre de 15 m de profondeur (PZ-LOISON-01) a donc été foré à la tarière mécanique ∅ 100 mm jusqu'à 4 mètres de profondeur puis au taillant ∅ 115 mm sur les 11 mètres suivants. Le forage a été équipé d'un tube plein (0-3 m). puis crépiné (3-15 m) PVC ∅ 64/75 mm et d'une tête au ras-de-sol.

Echantillonnage et analyses différées des eaux souterraines au laboratoire

Les eaux souterraines ont été échantillonnées en mars 2019 à Loison en situation de hautes eaux, au moyen d'une pompe électrique immergée, après purge des ouvrages jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques, selon les recommandations et standards de la norme NF-X 31-615. Ont été recherchés dans les eaux les composés constituant les REG et leurs sous-produits de transformation environnementale en privilégiant les éléments et composés les plus mobiles (vers et au sein des eaux souterraines) et les plus toxiques :

- <u>Les composés inorganiques</u> (laboratoire du BRGM Orléans) : nitrates (NO_3^-), ammonium NH_4^+), chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), arsenic (As), zinc (Zn), étain (Sn), brome total (Br), chlorures (Cl^-,

- Les composés organiques (laboratoire Envilytix GmbH, Wiesbaden, Allemagne): les NAC apolaires et leurs sous-produits de transformation environnementale (famille du TNT, des isomères de l'amino-dinitrotoluène, les isomères du dinitrotoluène, des di- et tri-nitronaphtalènes, des acides benzoïques, des isomères de la nitroaniline), les NAC polaires et leurs sous-produits de transformation environnementale (famille du 2,4,6-trinitrophénol et du dinitrophénol), les impuretés persistantes (thianes) et le solvant (chlorobenzène) de l'*Ypérite,* l'acide diphénylarsinique (ADPA) et l'oxyde de triphénylarsine (issus de la transformation des *Clark* (chlorure et cyanure de diphénylarsine)), et les stabilisants (phénylamines, *Akardite* (3-methyl-1,1-diphenylurée), *Centralite* (1,3-diethyl-1,3-diphenylurée)).

Les paramètres physico-chimiques standards ont été mesurés sur site au moment de l'échantillonnage. Les eaux destinées à l'analyse des composés inorganiques ont été filtrées à 0,45 µm et, pour le conditionnement en flacons en PE (pour l'analyse de Zn, Sn et As) acidifiés à l'acide nitrique. Ces échantillons ont été conditionnés et placés à l'abris des chocs et de la lumière, pour être livrés au laboratoire dans un délai inférieur à 48 heures. Les eaux brutes et non filtrées, destinées à l'analyse des composés organiques, ont été conditionnées dans des flacons en verre brun d'un litre. Ils ont été colipostés sous un délai de 48 heures à destination du laboratoire.

Caractérisation des eaux souterraines. Résultats

Les analyses au laboratoire n'ont pas détecté de composés organiques à des concentrations supérieures aux limites de quantification appliquées (0,5 µg.L^{-1}). Pour les métaux, métalloïdes et autres composés inorganiques, seules des traces d'ions chlorate (14 µgClO_3^-.L^{-1}) ont été détectées dans l'échantillon de mars 2019.

A noter la faible profondeur du niveau statique (qui se situe à 2,1 et 1,6 m/sol respectivement en janvier et en mars 2019). La nappe phréatique de la Dalle d'Etain est donc ainsi possiblement en charge (captive) sous la couche argileuse callovo-oxfordienne tégumentaire (les argiles ayant été reconnues au moment du forage jusqu'à 3,7 m de profondeur).

4.2.7 Conclusion et schéma conceptuel de transfert du site

Malgré l'occurrence de très nombreux fragments de REG à l'affleurement dans les sols labourés, la dégradation de la qualité chimique des sols de surface restait modérée et ne remettait pas en cause l'usage agricole de la parcelle. Très probablement, le labour a contribué à brasser les sols pollués avec les terrains alentours peu ou pas marqués (effet de dilution). La densité de points d'échantillonnage était aussi vraisemblablement insuffisante pour évaluer la présence des résidus d'explosifs dans les sols de surface, distribués de façon hétérogène, sur une vaste surface. Les pollutions concentrées se localisent vraisemblablement en profondeur, sous la hauteur du labour et au cœur (et possiblement aux points bas) des entonnoirs comme tendent à le démontrer les résultats de la campagne d'exploration géomagnétique.

Une plus grande densité de points d'échantillonnage des sols de surface aurait vraisemblablement permis de quantifier plus finement le fond géochimique local et d'apprécier l'occurrence, la nature et la dispersion de points anomaliques.

Les eaux souterraines de la nappe phréatique de la Dalle d'Etain constituent un milieu vulnérable eu égard aux constituants des matériaux de remblaiement des entonnoirs d'éclatement du champ de Loison, compte tenu de la proximité des niveaux statique et de la faible épaisseur de la couche d'argile callovo-oxfordienne, par endroit par ailleurs percée par les détonations.

En l'absence de points d'accès à la nappe au droit et aux abords du terrain d'explosion, la pose d'ouvrages de reconnaissance des eaux (piézomètres) s'est avérée nécessaire. Mais les contraintes d'accès au champ d'explosion, l'usage agricole des terrains et l'absence de maîtrise foncière des parcelles idéalement visées par l'implantation (refus d'autorisation de pénétrer et d'installer un ouvrage) n'autorisèrent l'implantation que d'un seul ouvrage, dont le positionnement n'est pas optimal pour caractériser l'impact du site sur les eaux souterraines puisqu'il a été positionné, au plus près du champ d'explosion, mais en amont de ce dernier.

Les eaux emplissant les vastes entonnoirs d'éclatement visibles sur le cliché historique ancien de 1922 correspondent donc vraisemblablement à la résurgence des eaux souterraines via le fond des entonnoirs (la nappe étant vraisemblablement captive et en charge sous les argiles callovo – oxfordiennes). Les remblais des entonnoirs formés de matériaux locaux (et donc ceux des auréoles de projection) sont ainsi très certainement en grande partie saturés en eau et directement au contact des eaux souterraines. Les eaux sont donc très vulnérables aux polluants présents dans ces matériaux car peuvent être mobilisés directement au contact des eaux par simple dissolution. Par ailleurs, les forts taux d'humidité associés à cet environnement, sont favorables aux mécanismes de corrosion des engins enfouis et en particulier ceux déjà endommagés. De fortes incertitudes subsistent donc sur l'impact réel de ce vaste champ d'explosion sur la qualité des eaux souterraines de la Dalle d'Etain dans un contexte de forte vulnérabilité des eaux et d'une mise au contact direct des matériaux potentiellement pollués (remblais hétérogènes) avec les eaux au cœur même des entonnoirs. Un marquage des eaux de la nappe de la Dalle d'Etain par des composés chimiques d'origine pyrotechnique apparaît très vraisemblable. Le croisement des informations environnementales et historiques acquises à la faveur de ces études et recherches permet in fine de proposer un schéma conceptuel de transfert cohérent du terrain d'explosion de Vaudoncourt Loison, faisant l'objet de la Figure 294 ci-après.

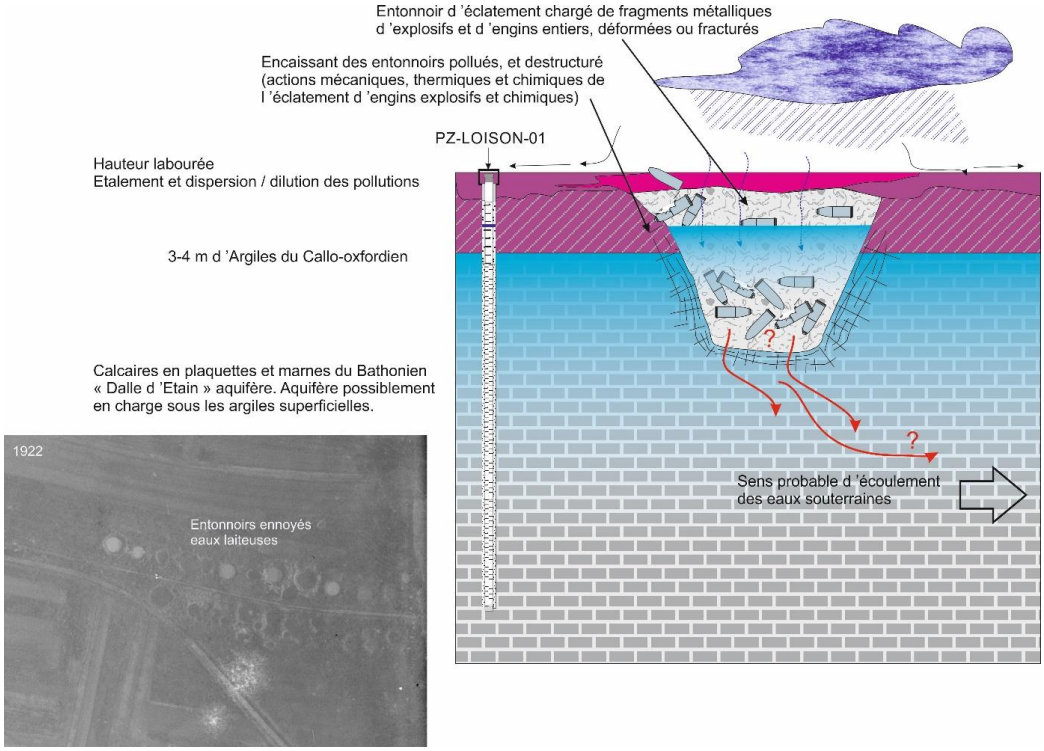


Figure 294 : Schéma conceptuel de transfert du champ d'explosion de Vaudoncourt Loison[1866].

[1866] Extrait de Hubé, D., Bâlon, P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final*. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019.

4.3. LE CHAMP D'EXPLOSION DE NOIRE FONTAINE A VAUDONCOURT

4.3.1 Description

Ce terrain d'explosion a été exploité par l'autorité militaire entre 1918 et possiblement 1920 pour commencer à détruire les munitions du vaste dépôt de Spincourt. Une reconnaissance de terrain sur le site du champ d'explosion de Noire Fontaine en janvier 2015 a permis de constater la persistance de nombreux entonnoirs d'explosion de dimensions et profondeurs variables, pour la plupart coalescents (en deux enfilades de presque 200 m de long), et, comme particulièrement visible sur le cliché aérien ancien de 1922 (cf. Figure 170), ennoyés par mise à l'affleurement de la nappe phréatique (en l'occurrence la nappe de la Dalle d'Etain (formation attribuée au Bathonien)). Cette mise à l'affleurement de la nappe est le résultat des multiples détonations violentes dont les effets, selon les témoignages consignés dans les archives, se firent ressentir à plus de 800 m de là, dans le village de Spincourt (cf. Section 7h du présent manuscrit). La majorité des entonnoirs ont également accumulé des sédiments et de la matière organique stagnante en décomposition. Le terrain d'explosion n'a pas été remblayé mais abandonné en l'état post-exploitation vers 1921-1922 puisque le cliché datant de 1922 montre la présence, tout contre les entonnoirs, d'installations semi-industrielles de démolition de munitions, possiblement exploitées par l'industriel Clere & Schwander. De telles installations ne pouvaient fonctionner que si les détonations dans le champ d'explosion avaient cessé.

Le site, actuellement envahi par une végétation dense, sert localement de dépotoir. Sa partie sud-est a été volontairement plantée de conifères possiblement du fait de difficultés de croissance des végétations indigènes.

Des éléments de munitions fracturées ont été observés sur le site (cf. Figure 298). Des éclats métalliques et fragments de munitions ont aussi été découverts dans les champs alentours à près de 200 m du champ d'explosion (zone de projection).

Cette auréole de projection parfaitement visible sur le cliché de 1922, coïncide aujourd'hui avec des terrains labourés et plantés de blé, orge, etc. Une observation notoire est celle au sein de l'auréole de projection, au cœur du site, d'eau stagnante fortement colorée en orange vif par des flocs (biofilms) bactériens riches en oxy-hydroxydes de fer (cf. Figure 295). Les sols au contact de ces eaux sont très compacts et montrent un caractère très hétérogène avec un aspect panaché, bréchique, et la présence dans la matrice argilo-limoneuse de nombreuses esquilles et éclats métalliques infra-centimétriques. Ce type de faciès est assez caractéristique de matériaux pédologiques remaniés et destructurés par les détonations.

L'impact spécifique des destructions anciennes par pétardement à Noire Fontaine sur la qualité des sols et des eaux souterraines comme superficielles, reste particulièrement complexe à établir avec certitude compte tenu de la possible imbrication d'influences des opérations de pétardement anté-1920 et celle, de brûlage et vidage, post-1920, visant sur ces deux périodes les mêmes matériels. Les ateliers Clere & Schwander s'installèrent à l'est du terrain d'explosion au sein de l'auréole de projection déjà possiblement constituée de matériaux pollués. Ainsi, n'ont été retenus dans ce qui suit pour tenter d'analyser le caractère polluant ou non des pétardements à Noire Fontaine que les résultats des analyses sur des échantillons collectés en dehors du périmètre des installations Clere & Schwander.

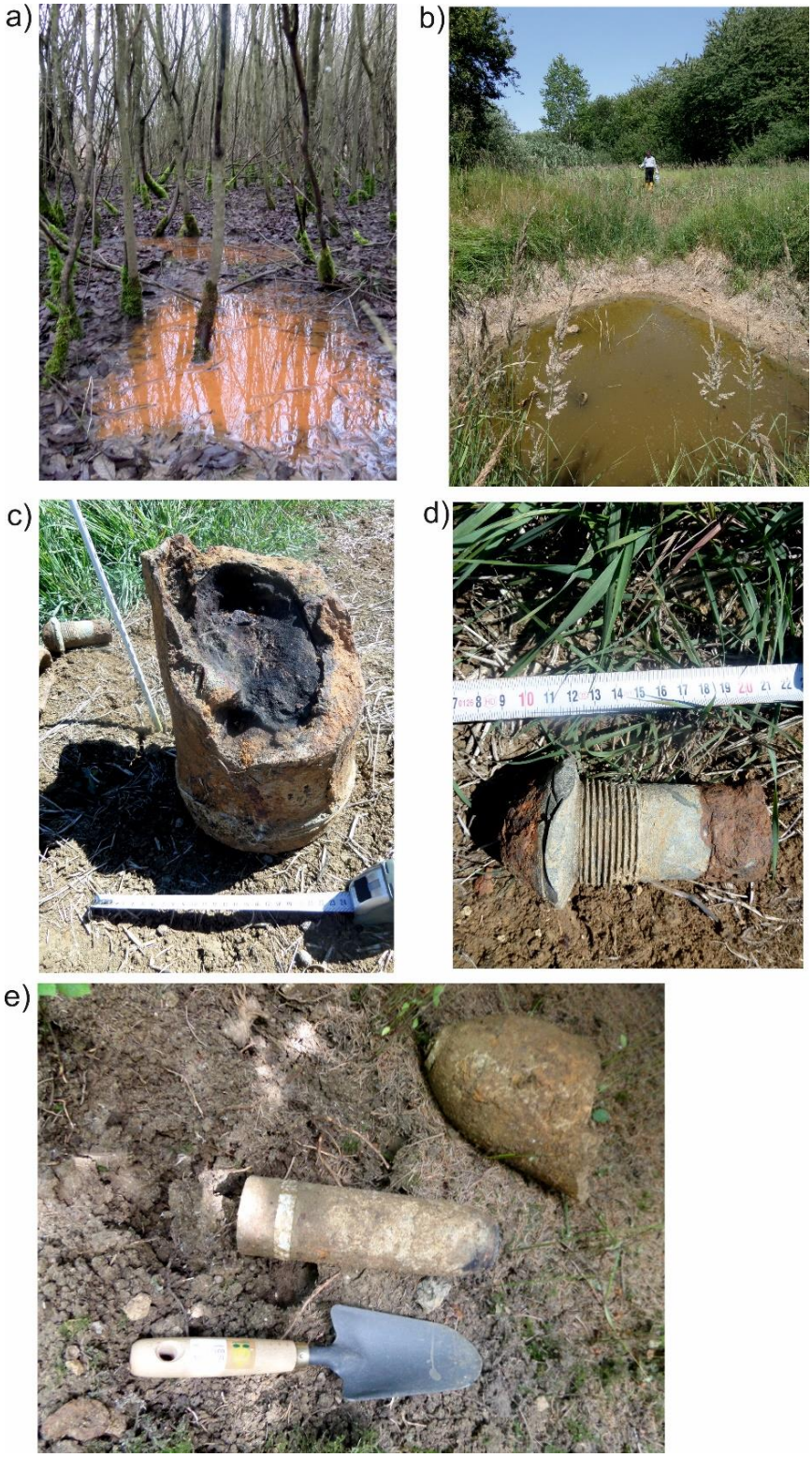


Figure 295 : Terrain d'explosion de Noire Fontaine à Vaudoncourt. Aperçus photographiques (2015, 2016). Complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (département de la Meuse), a) eau et flocs bactériens orangés, ferrugineux, au sein de l'auréole de projection, au cœur du terrain d'explosion, b) Un entonnoir d'explosion ennoyé, c) culot ovalisé d'un obus de 210 mm encore chargé de son explosif, d) une fusée allemande endommagée avec sa gaine d'éclatement, e) ogive sectionnée d'un obus de 150 mm et une bombe de tranchée allemande de 76 mm [1867].

[1867] Hubé, D. (2015, 2016).

4.3.2 Diagnostics exploratoires des sols de surface, des eaux de surface et sédiments des entonnoirs

Des protocoles d'échantillonnage et d'analyses similaires à ceux mis en oeuvre au champ d'explosion de Vaudoncourt Loison ont été appliqués pour caractériser la qualité des sols de surface du champ d'explosion de Noire Fontaine. A noter que la densité des échantillons n'a été adaptée ni aux dimensions du site, ni aux hétérogénéités de distribution des polluants potentiels, du fait de l'absence d'usages des terrains de l'ancien champ d'explosion et des efforts (techniques, financiers) déployés par ailleurs pour, dans un temps très limité, sortir des états de tension générés par la mise sous séquestre des parcelles attenantes au terrain d'explosion avec en creux la problématique posée de la compatibilité de l'usage agricole avec la qualité des sols.

Un référentiel d'interprétation. Le fond géochimique local

Les résultats analytiques sur les sols et sédiments ont été interprétés en comparant les teneurs mesurées à celle du fond géochimique naturel local proposé sur la base de l'étude statistique de l'ensemble des teneurs obtenues sur le site de Noire Fontaine et son proche environnement (cf. Tableau 45).

On constate à Noire Fontaine que le fond géochimique local en arsenic s'établit aux alentours de 20-25 mgAs.kg^{-1} MS, ce qui est cohérent avec les valeurs de fond géochimique naturel élevé que l'on peut mesurer localement en Lorraine, dans les secteurs où affleure les formations du Jurassique inférieur (Lias).

Concernant le zinc, le fond géochimique local s'établit aux alentours de 250 mg.kg^{-1} MS, ce qui est cohérent avec les valeurs de fond géochimique naturel que l'on peut mesurer localement en Lorraine.

Pour l'étain, 5 mesures / 82 montrent des teneurs inférieures à la LQ (Limite de Quantification), variant de 1 à 5 mgSn.kg^{-1} MS selon les matrices et échantillons. La valeur haute du fond géochimique local s'établit aux alentours de 50 mgSn.kg^{-1} MS.

Pour le plomb, 1 mesure/87 montre une teneur inférieure à la LQ, fixée à 1 mgPb.kg^{-1} MS. La valeur haute du fond géochimique local s'établit aux alentours de 35 mgPb.kg^{-1} MS.

Sur les 88 analyses de cadmium réalisées au laboratoire, seules 22 montrent des teneurs supérieures à la limite de quantification, comprise entre 0,3 et 1,5 mgCd.kg^{-1} MS selon les matrices et les échantillons. Les teneurs quantifiées oscillent entre 0,3 et 4,5 mgCd.kg^{-1} MS. Le cadmium n'est donc pas, contrairement au site de de la ferme de Rampont, un polluant de prime importance dans le marquage environnemental des sols à Noire Fontaine.

Le mercure a été quantifié sur 73 échantillons des 82 prélèvements effectués. La valeur haute du fond géochimique local mercuriel s'établit vers 0,8-0,9 mgHg.kg^{-1} MS. 80 % des valeurs quantifiées en mercure sont inférieures à 0,9 mgHg.kg^{-1} MS. Deux valeurs nettement anomaliques excèdent 20 mgHg.kg^{-1} MS.

La valeur haute du bruit de fond pour le cuivre englobe 70 % des analyses quantifiées, soit une teneur de 65 mgCu.kg^{-1} MS. La fourchette d'anomalie modérée est de [65-200 mg.kg^{-1} MS]. Seules deux valeurs excèdent les 200 mgCu.kg^{-1} MS. La valeur maximale mesurée est de 520 mgCu.kg^{-1} MS.

Les fonds géochimiques anthropisés pour les dioxines (PCDD, PolyChloroDibenzo-p-Dioxines) et furanes (PCDF, PolyChloroDibenzoFuranes) chlorées s'établissent classiquement dans les gammes de 1 à 2 ng.kg^{-1}[1868] (bruit de fond rural). Pour les composés organiques nitrés issus des explosifs et pour les toxiques de guerre, leur détection constitue en soi déjà une anomalie (composés xénobiotiques n'appartenant pas au fond géochimique naturel ou anthropisé (comme pour les dioxines et furanes)).

Ce travail d'évaluation du fond géochimique local n'a pas été réalisé pour le site de Vaudoncourt Loison, statistiquement, le nombre de points et d'analyses étant non suffisants pour cet exercice. Etabli sur le même type de formation géologique, ces valeurs sont extrapolables aux sites du canton de Spincourt (Noire Fontaine, Rampont, etc.).

Elément	Nombre de quantification / d'échantillons analysés	Valeur haute du fond géochimique local (mg.kg^{-1} MS)	Gamme d'anomalie modérée (mg.kg^{-1} MS)	Gamme d'anomalie élevée (mg.kg^{-1} MS)	Valeur maximale mesurée (mg.kg^{-1} MS)
Arsenic	87/88	20	20 - 200	200 – 1 000	1 000
Cadmium	22/88	0,3-4,5			
Cuivre	40/41	65	65 - 200	200 - 520	520
Etain	82/87	50	50 - 500	500 - 2700	2 700
Mercure	73/82	0.9	0,9 - 3.4	3,4 - 23	23
Plomb	87/88	35	35 - 150	150 – 1 400	1 400
Zinc	87/88	250	250 - 750	750 - 3 800	3 800

Tableau 45 : Valeurs hautes de bruit de fond en éléments tracées métalliques et gammes de valeurs anomaliques pour le site de Noire Fontaine à Vaudoncourt.

Principaux résultats

Les eaux des flaques orangées, collectées en janvier 2015, sont très nettement marquées par les impuretés et sous-produits de transformation environnementale des toxiques de guerre avec l'acide diphénylarsinique (20,4 µg.L^{-1}) (dérivés des chlorures de diphénylarsines des obus ex-allemands à *Croix bleue*), le 1,4-dithiane (0,46 µg.L^{-1}), le 1,4-oxathiane (0,8 µg.L^{-1}) et le 1-oxa-4,5-dithiepane (0,43 µg.L^{-1}), des impuretés typiques des *Ypérites* chargeant les engins chimiques à *Croix jaune*. Un échantillon de sol de surface prélevé sur ce secteur montre des teneurs nettement anomaliques en arsenic avec 250 mg.kg^{-1} MS.

Les sédiments d'un des l'entonnoir d'explosion du champ de destruction de Noire Fontaine montrent des teneurs élevées en arsenic (avec 180 mg.kg^{-1} MS), en zinc (avec 350 mg.kg^{-1} MS) et en étain (avec 19 mg.kg^{-1} MS) par rapport au bruit de fond géochimique local. Ces éléments sont associés à des composés organiques avec des traces de :

- 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) à hauteur de 0,11 mg/kg MS, de 1,3,8-trinitronaphtalène (1,3,8-TNN) à hauteur de 0,13 mg/kg MS, et de 3-nitroaniline avec 0,06 mg.kg^{-1} MS ;
- d'acide diphénylarsinique à hauteur de 0,49 mg.kg^{-1} MS ;
- de furanes chlorées (avec Σ PCDF de 60 ng.kg^{-1} MS).

Les NAC et l'ADPA sont des traceurs des chargements de munitions explosives et/ou chimiques de la Grande Guerre et pour l'ADPA, des munitions chimiques allemandes à *Croix bleue* typique de la dernière année de la guerre (cf. Section 1h du présent manuscrit).

[1868] Bodenan, F., Michel, P. (2013). *Dioxines dans les sols français : troisième état des lieux – analyses 1998 – 2012. Rapport final.* BRGM / RP – 63111 – FR. Décembre 2013.

Les eaux de cette enfilade d'entonnoirs d'explosion sont par ailleurs plus riches en As que le fond hydrogéochimique, avec en août 2016 et octobre 2017 respectivement 162 µg.L^{-1} et 130 µg.L^{-1}. L'arsenic inorganique est associé aux composés organo-arséniés : acide diphénylarsinique à 23,6 µg.L^{-1} (août 2016) et 11 µg.L^{-1} (octobre 2017).

4.3.3 Un chimisme des sols, des eaux et des sédiments témoignant de la destruction de munitions chimiques au sein du terrain d'explosion

La présence de ces composés et métaux (i) parmi les matériaux formant l'auréole de projection, (ii) dans les eaux des entonnoirs et les sédiments accumulés en leur fond est symptomatique de la présence dans les fourneaux d'éclatement par OD de munitions chimiques. Les thianes sont des composés soufrés cycliques persistants, présents dans l'*Ypérite* ou se formant par des réactions environnementales de ce toxique de guerre[1869].

L'acide diphénylarsinique est un sous-produit issu de l'oxydation des chlorures et cyanures de diphénylarsine (les *Clark 1* et *Clark 2* des obus à *Croix bleue* allemands)[1870]. TNT, TNN et nitroanilines sont des explosifs typiques de la Première Guerre mondiale. A noter que le TNT et le 1,3,8-TNN étaient les explosifs standards ayant chargé les obus allemands à *Croix bleue*. L'occurrence de furanes chlorées (PCDF) est un indicateur de la décomposition thermique à basse température (400-500°C) de substances hydrocarbonées en présence de chlore, comme cela sera largement abordé dans la Section 3e du présent volet du manuscrit.

L'hypothèse de la présence d'obus ou de fragments d'obus à *Croix bleue* et/ou de fioles d'arsine et/ou de résidus de démolition de ces obus dans les entonnoirs est plausible, qu'il s'agisse de restes provenant de fourneaux lors des opérations de destruction ou de déchets volontairement précipités sous l'eau dans les entonnoirs ennoyés à la faveur des travaux de Clere & Schwander postérieurement à l'exploitation du champ d'explosion (ou encore par les agricultures à la faveur de découvertes d'engins de guerre enfouis à proximité immédiate, lors du labour.

[1869] Munro N.B., Talmage S.S., Griffin G.D., Waters L.C., Watson A.P., King J.F., Hauschild V. (1999). *The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products. Environ Health Perspect.* 1999 Dec;107(12):933-74. doi: 10.1289/ehp.99107933. PMID: 10585900; PMCID: PMC1566810.

[1870] Ishii K, Tamaoka A, Otsuka F, Iwasaki N, Shin K, Matsui A, Endo G, Kumagai Y, Ishii T, Shoji S, Ogata T, Ishizaki M, Doi M, Shimojo N. (2004). *Diphenylarsinic acid poisoning from chemical weapons in Kamisu, Japan. Ann Neurol.* 2004 Nov;56(5):741-5. doi: 10.1002/ana.20290. PMID: 15505777.

5. Résumé et conclusions de la Section 2e

Le pétardement (*Open Detonation*) est une méthode ancienne, radicale, de neutralisation des projectiles explosifs. Elle se base sur la transmission volontaire d'une détonation (d'une charge initiale « donneuse ») par « sympathie » à un ensemble de munitions et/ou matériels explosibles généralement organisés en tas selon des designs permettant aux artificiers d'optimiser la détonation (fourneaux) en terme de rendement (masse détruite / masse initiale à détruire). En effet, les engins visés par ces démolitions peuvent suivre en une même opération, en un même lieu, sous l'impulsion d'une même détonation initiale, tout ou partie des trois régimes (i) une détonation de haut-ordre, (ii) une détonation de bas-ordre et (iii) l'absence complète de détonation. Dans le premier cas les munitions sont intégralement lacérés en une multitudes d'éclats et fragments de différentes tailles tandis que le chargement est quasiment intégralement décomposés (avec des taux d'imbrûlés inférieurs à 0,001% du chargement initial). Dans le second cas, les *casings* sont fracturés et le chargement partiellement décomposé, l'explosif étant libéré sous forme de particules parfois grossières (*flakes* et *chunks*). et/ou reste solidaire des fragments métalliques pour les parties les plus solides des engins (culots, ogives). Enfin, dans le troisième cas les engins restent intègres mais subissent souvent, du fait des fortes contraintes mécaniques lors de l'explosion des fourneaux, des déformations (ovalisation, fissurations, etc.).

Les ondes de choc des détonations répétées à même le sol, en un même point, se traduisent par une compression, une désagragation du sol et l'expulsion des matériaux pédologiques autour du point de détonation. Les fragments métalliques des *casings*, ceux des chargements imbrûlés et les engins non détonés se mêlent aux matériaux de sol destructuré. Des élements de munitions sont littéralement « injectés » dans les sols à la base des fourneaux. Des dépressions circulaires aux bordures surélevées (lèvres), désignées par « entonnoirs », s'ouvrent ainsi. Les dimensions de ces entonnoirs, peuvent dépasser plusieurs dizaines de mètres de diamètre pour plus de 5 mètres de profondeur, qui dépendent de la nature du sol, de la puissance des fourneaux, et du tonnage détruit. Après détonation, une partie des matériaux retombe dans l'entonnoir (*fall-back*). alors que d'autres sont éjectés par-dessus les lèvres à plusieurs dizaines de mètres du point de détonation (zone de retombée (*fall-out*) appelée zone de projection dont la géométrie peut être influencée par les vents dominants). Des engins ou fragments de grandes dimensions peuvent être éjectées encore plus loin, jusqu'à des distances kilométriques, et retombent dans la zone de dispersion (*Streugebiet*).

L'entonnoir est généralement abandonné lorsque sa profondeur rend son point le plus bas (où étaient positionnés les fourneaux) difficilement accessible pour les artificiers ou encore lorsqu'il est envahi par les eaux (de la nappe mise à nu ou les eaux de ruissellement). Les démolitions sont alors poursuivie si nécessaire dans un entonnoir exploitable proche voisin. C'est ainsi que les entonnoirs peuvent se succéder en enfilades, en rangées parallèles, isolées ou coelescentes pour former des terrains d'explosion pouvant comporter plusieurs dizaines d'entonnoirs. Une classification des terrains d'explosion selon leurs dimensions (en nombre d'entonnoirs, leurs diamètres et profondeurs) a été proposée par une étude du LfU du Land de Bavière concernant les terrains de pétardement post Seconde Guerre mondiale en Allemagne[1871]. Ces terrains ont été positionnés au plus près des dépôts de munitions à liquider mais si possible à une distance de sécurité suffisante des populations, en tenant compte aussi des difficultés ou facilités aux voies de communication pour la logistique.

[1871] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit*.

Parfois encore, les destructions furent opérées dans des dépressions existantes, comme des cratères d'impact, cratère de mine ou carrières. Les terrains d'explosion furent abandonnés tels quels post-exploitation, se comblant alors partiellement, progressivement et naturellement par des particules fines (colluvionnement) et de la matière organique. D'autres, notamment en environnement agricole, furent remblayés par des matériaux sains apportés ou par ceux, éparpillés et potentiellement pollués, présents dans la zone de projection ou par des déblais et détritus (dépotoirs).

Compte tenu (i) de la coexistence des trois comportements des engins chargeant les fourneaux sous l'effet de la sollicitation de la détonation initiale, (ii) de la grande diversité des munitions détruites, les résidus issus des munitions présents dans les entonnoirs et dans la zone de dispersion sont extrêmement hétérogènes en compositions et dimensions.

L'évaluation qualitative et quantitative des masses résiduelles introduites dans les sols et le taux de décomposition des masses des chargements, lors des détonations des fourneaux de destruction formés d'engins de la Grande Guerre n'a pas fait l'objet de recherches et études spécifiques au regard des éléments bibliographiques rassemblés dans le cadre de la présente recherche. Seule une approche analogique avec les résultats acquis (i) sur des munitions modernes tirées sur les champs de tir et terrains d'exercice actifs en Amérique du Nord (ERDC (2014))[1872] et (ii) sur des terrains d'explosion de destruction des REG post-Seconde Guerre mondiale en Bavière (LfU (2009)) peut être proposée, dont les limites sont discutées.

Ces études sur des munitions d'artillerie modernes montrent que la valeur de 0,001% (ERDC (2014)) de la charge explosive initiale constitue une valeur haute pour le taux de dispersion des imbrulés après détonation de haut-ordre (HOD). Une valeur similaire, de 0,003%, est retenue par le LfU (2009). La granulométrie de ces particules d'imbrûlés est très fine, de l'ordre ou inférieure à 1 mm. Le taux de 50% a été retenu dans les modèles nord-américains pour quantifier la masse résiduelle après détonation de bas-ordre[1873]. Les dimensions des particules retenues dans les modèles de transfert environnementaux nord-américains sont typiquement inférieures à 100 mm[1874]. Il s'agit des fragments millimétriques (*flakes*) à centimétriques (*chunks*). Le LfU (2009) a volontairement écarté l'usage de ces valeurs estimant le % d'incertitudes trop élevé. On rappelle ici que les masses d'éléments métalliques sont conservées mais dispersées en une multitude de fragments par les détonations.

Ces valeurs proposées par l'ERDC (2014) comme par le LfU (2009) ne sont qu'indicatives et aucunement représentatives des masses résiduelles laissées par les pétardements massifs de fourneaux au terme de la Première Guerre mondiale. En effet, la masse et donc la puissance de la charge explosive initiale « donneuse » étaient infiniment plus faibles que la masse des fourneaux à démolir. Les valeurs publiées dans la littérature, ont été établies sur des projectiles modernes et des pratiques de démolition actuelles (forte charge de démolition initiale eu égard aux masses à détruire). Ces facteurs historiques contribuèrent très vraisemblablement à produire des fractions de résidus peu ou pas détonés, difficilement quantifiables, mais vraisemblablement nettement plus élevées que celles avancées dans la littérature, comme l'attestent certains documents photographiques ou cinématographies historiques récoltés dans le cadre de cette recherche mais aussi les observations remontées du terrain.

[1872] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit.*

[1873] *Ibid.*

[1874] *Ibid.*

La nature, les dimensions, les quantités et densités de résidus laissés post-détonation, dont dépendent la nature, l'extension, la magnitude et la rémanence des pollutions, des eaux souterraines et/ou des sols, générées par les sites de pétardement, sont vraisemblablement très variables d'un terrain de destruction à l'autre, voire d'un entonnoir à l'autre.

(i) Les travaux de recherche publiés concernant la rémanence de résidus après détonation de fourneaux de destructions ou d'engins isolés ((ERDC, 2014), LfU (2009), Tomic (2018)), (ii) les résultats d'études originales sur des terrains de destruction mis à disposition pour cette présente recherche ou encore (iii) ceux issus d'études de cas réalisés dans le cadre de ce doctorat (dans le département de la Meuse (Douaumont, canton de Spincourt), dans le département du Nord (Trélon)), démontrent sans équivoque que les opérations de destruction de REG par pétardement sont polluantes et constituent un vecteur d'introduction dans les sols environnants de composés métalliques (principalement Fe, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb, Al, etc.) et d'origine pyrotechnique (majoritairement des NAC et des nitramines). Le caractère polluant de ces sites eu égard aux eaux souterraines a aussi été démontré. A noter que des substances typiques de la décomposition thermique et environnementale des toxiques de guerre, agents fumigènes, incendiaires, éclairants sont aussi potentiellement présents sur certains sites, des munitions possédant ces types de chargement furent aussi éliminées par OD.

Si les teneurs dans les sols en métaux, métalloïdes et autres NAC (sous-produits de transformation environnementale compris), mesurées ponctuellement sur quelques terrains d'explosion en Meuse et dans le Nord dans le cadre de cette recherche, restent faibles à modérées, il est vraisemblable qu'elles ne reflètent en rien celles susceptibles d'être rencontrées à la base des anciens entonnoirs où se concentreraient l'essentiel des fragments issus des munitions. En ce sens, ces zones de pollution concentrée sont avant tout à considérer comme des sources potentielles susceptibles de dégrader la qualité des eaux souterraines (cf. Figure 296). Les fragments de chargement présents dans ces entonnoirs subissent les effets de la dissolution au contact des eaux météoriques infiltrées qui alimentent *per descensum* les nappes tandis que des mécanismes de corrosion désagrègent sur les moyens et longs terme les enveloppes métalliques des engins, causant à terme (des dizaines et centaines d'années) la perte de tout ou partie de leur intégrités et l'exposition des chargements à l'environnement.

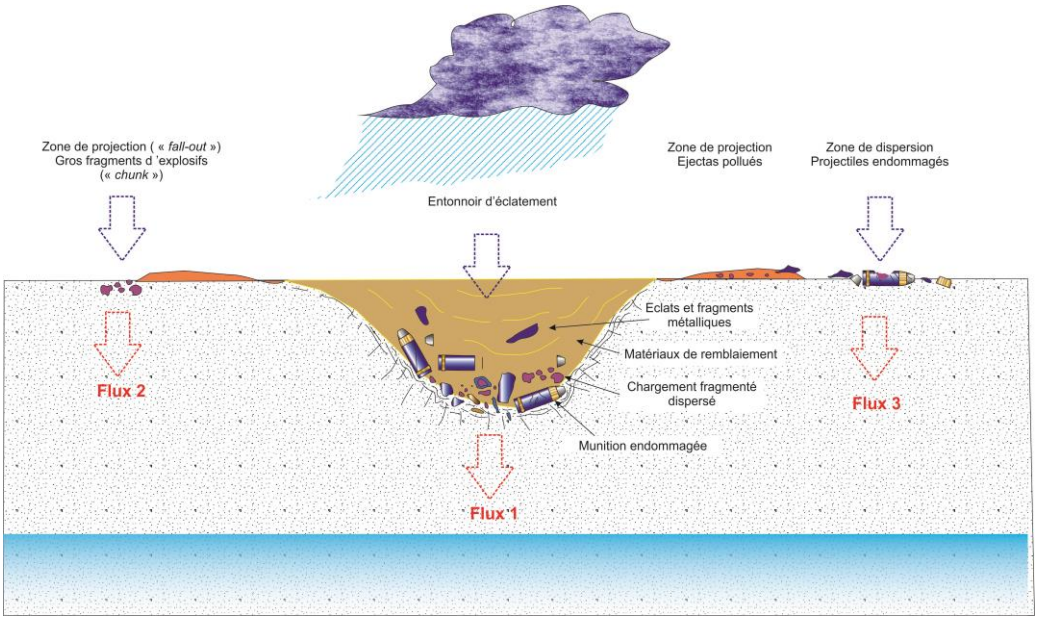


Figure 296 : Répartitions des matières issues des engins de guerre susceptible d'influencer la qualité des eaux souterraines, au droit et aux abords des terrains d'explosion.

Les entonnoirs susceptibles d'être les plus marqués sont ceux (i) ayant démolis de forts tonnages de munitions explosives de gros calibres (les engins de petits calibres étant plus solides et plus résistants à la fracturation), (ii) ayant été remblayés par les matériaux de la zone de projection, et (iii) ceux n'ayant pas fait l'objet de recherches (par piochage) et de récupération dans l'entre-deux-guerres. Les terrains de destruction par OD représentent plus de 75% de l'ensemble des (environ 200) sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans l'inventaire national du BRGM[1875]. Cet inventaire est non exhaustif. L'existence de ces sites ne préjuge en rien de leur état de pollution.

Les terrains d'explosion au sein desquels de forts tonnages de munitions furent éliminées par OD peuvent avoir concentré des masses importantes de fragments métalliques et de composés entrant dans la constitution des chargements quels que soient les taux de décomposition des chargements à l'issue des détonations.

Les fragments de chargement présents dans les zones de dispersion contribuent, tout comme les zones de pollution concentrée formées par les entonnoirs, au flux global en composés solubles et persistants formant les chargements rejoignant et dégradant les eaux souterraines. Avec le temps, la contribution à la libération de flux et masses de composés vers les sols et/ou les eaux souterraines issus des engins de guerre enfouis, non explosés, tirés ou non, en cours de corrosion va irrémédiablement s'accroître contrairement à celle des fragments d'explosifs déjà introduits dans l'environnement consécutivement aux détonations (haut- comme bas-ordre) en cours de vieillissement (pertes de masse par dissolution).

Enfin, les reconnaissances de terrain réalisées sur les sites de pétardement en Meuse (canton de Spincourt, Argonne, etc.), dans le Nord, dans l'Aisne montrent que les terrains d'explosion datant de l'entre-deux-guerres constituent encore des sites dangereux où la probabilité de découverte d'engins de guerre encore en puissance d'explosion (pollution pyrotechnique) est élevée.

[1875] Hubé, D. (2019). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales. Rapport final.* BRGM/RP-68476-FR. Janvier 2019.

Section 3e
Open Burning et *Burning Grounds*. *Fingerprint* environnemental des résidus et pollutions générés par les opérations historiques de liquidation des Restes Explosifs de Guerre par brûlage

1. Introduction de la Section 3e

1.1. DEFINITIONS ET OBJECTIFS

1.1.1 Définition de l'*Open Burning*, principe et objectifs

Le brûlage à l'air libre (*Open Burning*, OB) constitue, avec la destruction par détonation (*Open Detonation*, OD), le déchargement par purge (pour les chargements liquides) ou par fusion à l'eau chaude (*wash-out*, pour les chargements explosifs), l'une des options techniques de déchargement de munitions et de liquidation des Restes Explosifs de Guerre. « *Open Burn* » est défini par le département de la défense US (*Department of Defence*, DoD) dans son manuel référencé 6055.9-M, Volume 8, en ces termes, « *An open-air combustion process by which excess, unserviceable, or obsolete munitions are destroyed to eliminate their inherent explosive hazards* » (DoD, 2012)[1876]. Cette définition moderne pointe la finalité actuelle de ces opérations de combustion à l'air libre des engins à rebuter : annihiler leur explosibilité et donc leurs fonctionnalités militaires. Les engins fléchés pour être éliminés par brûlage seraient, à la lumière de cette définition américaine, ceux à chargement explosifs.

Le brûlage fut pratiqué au sortir de la Grande Guerre sur des quantités importantes (plusieurs milliers de tonnes) de matières et matériels de guerre en tout genre qui peuvent être catégorisés en quatre groupes (i) les explosifs ou des résidus / déchets d'explosifs (comme les boues provenant de la fusion à l'eau chaude de mélanges d'explosifs impurs (cf. Section 11h du présent manuscrit)), (ii) les poudres propulsives (ergols solides principalement nitrocellulosiques) et poudres noires, (iii) les engins à chargements chimiques (principalement solides ou liquides) et (iiii) les matières et chargements divers (incendiaires, fumigènes, artifices en tout genre (signaux, torches, etc.)). Différents designs de dispositifs de brûlage, ainsi que des séquences de brûlage, tous spécifiques à certains chargements de munitions, furent pensés puis mis en œuvre à l'échelle opérationnelle et industrielle dans l'entre-deux-guerres (à l'instar de ceux exposés par Michael Kostevitch et la société F.N. Pickett & Fils (cf. Section 10h du présent manuscrit)). Ces méthodes et moyens de brûlage sont décrits et explicités à la Section 11h du présent manuscrit. Dans l'entre-deux-guerres, le brûlage était considéré comme aujourd'hui encore une méthode de neutralisation des engins de guerre mais surtout un moyen sûr de déchargement des REG ne pouvant être déchargés efficacement en toute sécurité par d'autres méthodes, comme le vidage par fusion à l'eau chaude, les purges après perçage, etc. dans le but de récupérer à des fins profitables les métaux récalcitrants à la combustion et constitutifs des engins

[1876] DoD (U.S. Department of Defence). 2012. Manual Number 6055.09-M, Volume 8. *DoD Ammunition and Explosives Safety Standards: Glossary*. https://www.wbdg.org/FFC/DOD/DODMAN/605509-M-V8.pdf.

Parfois encore, le brûlage était pratiqué sur des engins chimiques à chargement liquide (comme ceux à chloropicrine, *Ypérite*, etc.) préalablement déchargés par perçage puis purge, afin de débarrasser les enveloppes (*casings*) des projectiles des ultimes égouttures. Le brûlage était aussi l'unique moyen de décharger les munitions renfermant des *Ypérites* anciennes, ces dernières ayant tendance avec le temps à polymériser et à prendre masse dans les *casings*. L'objectif était *in fine* de pouvoir récupérer le métal constitutif des engins, le chargement non valorisable et/ou non extractible étant irrémédiablement perdu (déchet).

Le principe de l'OB est simple et se fonde sur la différence de comportement au feu entre d'une part les éléments métalliques constitutifs des engins de guerre – à récupérer -, résistant à des températures élevées, et d'autre part des chargements – à éliminer - formés majoritairement de substances organiques qui se décomposent (se pyrolysent ou entrent en combustion) lorsque la température s'élève. Les explosifs fondaient avec l'élévation progressive de la température, puis brûlaient vigoureusement sans détoner, les engins ayant été préalablement ouverts (chargement déconfiné) par le retrait du détonateur (fusée-gaine). Les séquences de brûlage comportaient une phase de montée en température, suivie par un plateau thermique plus au moins long, suivi par une phase de refroidissement.

Lorsque le brûlage était réalisé dans des fours ou sur des plateformes, on parle plutôt de « grillage » (« *Rosting* » comme largement pratiqué pour les fusées d'artillerie et les munitions de petits calibres et d'armes portatives (*Small Arms Ammunition*, SAA)).

1.1.2 Contenu et articulation de la section

La présente Section 3e du volet environnemental ne prétend pas décrire de façon exhaustive l'extension, la nature des pollutions connues, étudiées, générées par les opérations de brûlage de REG dans l'entre-deux-guerres, mais vise à identifier puis à décrire les caractéristiques chimiques (signatures chimiques multi-paramètres ou *Fingerprint*), physiques, pyrotechniques communes à ces résidus de brûlage et aux pollutions associées (*Fingerprint* génériques) et les éventuelles spécificités propres à certains sites, puis à mettre en perspective ces caractéristiques communes ou distinctives avec des faits et pratiques historiques documentées. Enfin, le potentiel de dégradation (i) de la qualité des milieux environnementaux (en particulier des sols et des eaux souterraines) et (ii) du libre usage de ces milieux sera discuté, en effectuant un parallèle avec celui des destructions historiques de matières et matériels de guerre par *Open Detonation*.

Cette Section 3e offre aussi l'opportunité de démontrer comment l'étude de la qualité des sols et des résidus de brûlage renseigne de façon originale sur la typologie des munitions et autres REG liquidés et sur des pratiques historiques de brûlage qui n'ont fait l'objet d'aucun enregistrement archivistique. Un développement particulier est consacré en ce sens aux enseignements de l'étude des dioxines et furanes (PCDD & PCDF) et des cortèges de composés associés.

1.2. *BURNING GROUNDS* . TERRAINS D'ETUDE

Les terrains de brûlage qui ont été étudiés, caractérisés, parfois de façon originale, détaillée et approfondie (dans le cadre de cette recherche ou des missions confiées au BRGM), ou pour lesquels des données qualitatives et quantitatives ont été gracieusement mises à disposition par des tiers pour cette recherche (sites d'Audruicq, de Westroozebeke et de Zweedorf) sont les suivants.

1.2.1 Sites en environnement forestier

a) Un ensemble de puits et terrains de brûlage rassemblés sous le nom générique de « Place à gaz » en forêt de Spincourt, commune de Gremilly (département de la Meuse), exploitée par la société F.N. Pickett & Fils comprenant (i) la clairière centrale (zone de brûlage et de dépôt de résidus de combustion centrale), (ii) une aire de brûlage dite « nord » périphérique et secondaire et (iii) une fosse comblée de résidus dans laquelle furent très possiblement opérées des destructions (de finition) par combustion. Par ailleurs, le détail des études environnementales sur la « Place à gaz » est rassemblé dans le rapport intitulé « *D. Hubé, D., Bâlon, P. (2015) Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55). Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-65376-FR. Décembre 2015* ». Sur ce site auraient été démolis plus de 200 000 projectiles ex-allemands (dont des munitions arséniées à *Croix bleue*), majoritairement chimiques, issus de récupérations dans la 6e Région militaire et rassemblés à proximité en 1919. F.N. Pickett & Fils aurait brûlé sur ce terrain entre 1926 et 1928 des engins laissés en souffrance par un précédent industriel défaillant. La « Place à gaz » forme une clairière d'environ 1 000 m^2 en forêt de Spincourt. Le tonnage démoli par Pickett s'établirait aux alentours de 8 000 tonnes (cf. Section 10h du présent manuscrit);

b) Les deux terrains de brûlage du Parc Jeannette à Trélon et le *Burning Ground* du Bois l'Abbé à Liessies (département du Nord), appartenant tous les trois à l'ancienne usine *C-Factory* de F.N. Pickett et Fils ; concernant l'historique de site on se référera à la Section 10h du volet historique du présent manuscrit. Le dépôt de rassemblement de Trélon Liessies comprenait des engins d'artillerie lourde, de tranchée, des engins chimiques de la 7e Armée prussienne et des engins issus de la récupération dans le Pas-de-Calais. Il s'agit du premier chantier exploité par F.N. Pickett & Fils en France, à compter de 1920. Michael Kostevitch y aurait expérimenté ses méthodes de déchargement par brûlage. Tout comme le site de la « Place à gaz », les brûlages furent opérés en environnement forestier. Les deux terrains de brûlage du Parc Jeannette forment deux clairières de 30 x 20 m (600 m^2) et 35 x 20 m (700 m^2) distantes de 100 mètres. Un terrain d'explosion fut exploité entre les deux terrains de brûlage. Des indices de terrain témoignent de la destruction sur les deux sites de fusées allemandes, d'engins d'artillerie de tranchée et, pour le plus grand, d'engins chimiques à *Croix bleue*. Des résidus de brûlage de ce type d'engins ont aussi été accumulés en bordure du terrain de brûlage. Ces terrains de brûlage furent installés à proximité immédiate des îlots de l'ancien dépôt de munitions sud, dont les ruines, les soubassements maçonnés, sont encore visibles. Le terrain de brûlage du Bois l'Abbé est, avec 30 x 40 m (1 200 m^2), le plus grand des trois sites. Il est implanté au droit du dépôt de munitions nord, à 1 500 m au nord du Parc Jeannette, parmi des ruines de l'ancienne usine Pickett. Des fusées de projectiles d'engins de tranchée, grenades, et projectiles chimiques auraient été déchargés par brûlage sur ce terrain. Le tonnage démoli n'est pas connu ; les deux dépôts (nord et sud) auraient renfermé plus de 2 millions d'engins ;

c) Le terrain de brûlage du « Bois Brûlé » de l'usine F.N. Pickett & Fils à Conteville (département de la Somme). Ce terrain de brûlage est implanté dans un petit bois délibérément évité par les labours. Les résidus de brûlage, particulièrement riches en allumeurs de grenades « œuf » ex-allemandes grillés, occupent une superficie d'environ 25 x 25 m (600 m^2). Le tonnage démoli par Pickett dans l'usine de Conteville s'établit aux alentours de 11 000 tonnes dont une fraction inconnue par brûlage (cf. Section 10h du volet historique). On rappelle ici que Pickett se substitua à un premier exploitant britannique, dénommé Armes Georges & Co, mandaté par le *Disposal Board*, mais en liquidation après une explosion accidentelle vers 1922.

Aucune information historique relative à ces opérations de brûlage à Conteville Domléger n'a été identifiée dans les archives collectées à la faveur de la présente recherche.

1.2.2 Sites en environnement agricole

a) Le terrain de brûlage de l'usine *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke, encore désigné par site de Poelkapelle (Langemark-Poelkapelle, Flandre occidentale, Belgique). Des munitions chimiques ex-allemandes rassemblées à Westroozebeke, qui n'avaient pas été détruites sur le centre de destruction de Mohret (Province du Luxembourg), furent détruites dans cette usine. Le tonnage éliminé par la *B-Factory* s'établirait aux alentours de 30 000 tonnes (dont une fraction inconnue par brûlage). Le terrain de brûlage est actuellement positionné à cheval, au sud, sur un champ planté de pommes de terre (en 2017) et, au nord, sur le terrain militaire du SEDEE[1877] / DOVO (terrain d'explosion et usine de destruction de munitions anciennes du déminage militaire belge) d'Houthulst. L'historique détaillé de ce site est exposé dans la Section 10h du volet historique du présent manuscrit ;

b) Le terrain de brûlage de l'usine *E-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Audruicq (département du Pas-de-Calais). Les travaux de recherche historique menés par T. Bausinger permettent de géolocaliser le terrain de brûlage à l'extrémité d'une branche du réseau dense de voies de chemin de fer ayant desservi le vaste dépôt de munition britannique d'Audruicq, entre le bourg d'Audruicq au nord-ouest et celui de Polincove au sud-est. F.N. Pickett & Fils a liquidé le dépôt britannique essentiellement par déchargement à la vapeur (obus explosifs). La *E-Factory* comprenait la plus grosse unité de *wash-out* de toutes les usines Pickett en France et en Belgique. Il est vraisemblable que les boues résiduaires issues de ces opérations aient été brûlée sur ce *Burning Ground*. Cette zone agricole d'habitat dispersé est actuellement majoritairement exploitée pour la culture du blé ;

c) Le puits et les tranchées de brûlage des installations de neutralisation de munitions et toxiques de guerre Clere & Schwander de Noire Fontaine, commune de Vaudoncourt (département de la Meuse). Le détail des études environnementales et historiques est rassemblé dans le rapport intitulé « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». Le complexe de désobusage industriel Clere & Schwander du canton de Spincourt démolit un dépôt de rassemblement de la 2e Région militaire, implanté sur un vaste dépôt ex-allemand, ayant comporté au moins 1 500 000 engins chimiques en tout genre et 300 000 projectiles explosifs, parmi lesquels des engins ex-allemands, français et britanniques. Le tonnage démoli par brûlage à Noire Fontaine n'est pas connu. Les systèmes de tranchées de brûlage sont positionnés en 2015 au droit d'un champ planté d'orge ;

d) Les deux terrains de brûlage de l'usine Clere & Schwander de Rampont, commune de Muzeray (département de la Meuse). Le détail des études environnementales et historiques concernant ce site est rassemblé dans le rapport intitulé « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». Ce site appartient au complexe de désobusage industriel Clere & Schwander du canton de Spincourt.

[1877] Service d'Enlèvement et de Destruction d'Engins Explosifs.

Le tonnage démoli par brûlage à Rampont n'est pas connu. Les terrains de brûlage sont positionnés en 2015 au droit d'un champ planté de blé et d'une pâture ;

e) Les terrains de brûlage de l'usine de démolition de munitions de Zweedorf, Mecklenburg-Poméranie (Allemagne). D'après les informations mises à disposition par le Pr. J. Preuss de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence, une aire de brûlage de l'usine de Zweedorf aurait été installée au droit d'un champ de Colza en 2001, au moment des investigations et études sur ce site (cf. Figure 303). Il n'est fait aucune mention de la nature et des tonnages des munitions détruites sur ce site dans la documentation consultée. Le contexte historique dans lequel se situe le site de Zweedorf est exposé dans la Section 10h du volet historique du présent manuscrit.

La recherche exposée dans cette section repose donc sur les données issues de caractérisations sur environ 12 « spots » de destruction de REG par brûlage datant de l'entre-deux-guerres. Ces sites (à l'exception de celui de Zweedorf) sont positionnés sur la carte de la Figure 297. Concernant l'historique de la plupart de ces sites et leurs contextes et conditions d'exploitation, le lecteur peut se référer à la Section 10h du présent manuscrit.

1.2.3 Analyse critique de la population de terrains de brûlage considérés dans cette recherche

Les sites Clere & Schwander du canton de Spincourt (Muzeray (Rampont) et Vaudoncourt (Noire Fontaine)) et ceux de la « Place à Gaz » sont ceux ayant fait l'objet d'études, d'investigations les plus détaillées et complètes visant la qualité des compartiments environnementaux sols de surface, sols de profondeur et eaux. Il s'agit donc à l'heure actuelle des sites pour lesquels on bénéficie des connaissances environnementales les plus exhaustives à l'échelle de terrains de brûlage.

Les sites de la « Place à gaz » et Clere & Schwander de Rampont et Noire Fontaine firent l'objet de diagnostics approfondis des différents compartiments de l'environnement susceptibles d'avoir été impactés par les opérations de brûlage de munitions dans l'entre-deux-guerres, avec comme finalité, l'évaluation de la compatibilité de l'état des sols, des eaux, avec leurs usages actuels selon une démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) au sens des textes encadrant la gestion des sites et sols pollués du Ministère en charge de l'Environnement d'avril 2017. Les données environnementales sur les sites de Trélon, Liessies, Conteville, Westroozebeke, sont originales et furent acquises dans le cadre de cette recherche et hors champ réglementaire. Une partie des données concernant le site de Westroozebeke[1878], l'intégralité de celles des sites d'Audruicq[1879] et de Zweedorf[1880] furent gracieusement mises à disposition par T. Bausinger (Envilytix) et le Pr. J. Preuss de l'Université Johannes Gutemberg de Mayence.

Les sites de brûlage de Clere & Schwander de la forêt de la Hardt (au nord-est de Mulhouse, département du Haut-Rhin) n'ont pas été géolocalisés, ni au terme d'une courte reconnaissance de terrain, ni après interprétation des orthophotographies anciennes.

[1878] Publié dans Bausinger T, Preuss J. (2005). *Environmental remnants of the first World War: soil contamination of a burning ground for arsenical ammunition. Bull Environ Contam Toxicol*. 2005 Jun;74(6):1045-52. doi: 10.1007/s00128-005-0686-z. PMID: 16158839.

[1879] Bausinger, T. Communication personnelle. Non publié.

[1880] Preuss, J. Communication personnelle. Non publié.

Aucun résidu de brûlage n'a été identifié lors d'une reconnaissance de terrain à l'emplacement le plus probable d'un terrain de brûlage qui aurait été exploité par Bouxin en forêt d'Illkirch, au sud de Strasbourg (département du Bas-Rhin). L'historique de ces sites alsaciens est présenté dans la Section 9h du volet historique du présent manuscrit.

L'emplacement du terrain de brûlage (Bouxin) de munitions chimiques de l'ERGMu de la Ferté Hauterive (département de l'Allier), au sein d'une actuelle emprise militaire, n'a pas été localisé (bien qu'une zone suspecte ait été identifiée sur orthophotographie ancienne). Il en est de même pour les tranchées de brûlage exploitées dans l'entre-deux-guerres au sein de l'ERGMu de Mézidon-Canon dans le département du Calvados. Il est vraisemblable que des terrains de brûlage aient aussi été installés et exploités sur des centres de destructions implantés au sein d'actuelles emprises militaires comme au camp de Suippes (département de la Marne), au camp de Sissonne (département de l'Aisne).

Les brûlages ayant été opérés par F.N. Pickett & Fils dans sa plus grosse usine, celle de Dannes Camiers, dans le département du Pas-de-Calais, sur l'estran, il est peu vraisemblable que des traces de résidus de brûlage encore mesurables et détectables de nos jours subsistent. Quant aux sites de brûlage de munitions Savot Frères & Cie de Bailleuil-sur-Thérin (Bois du Quesnoy) dans le département de l'Oise, et de grillage de fusées de la Chapelle Saint-Ursin dans le département du Cher, aucune reconnaissance de terrain n'a été entreprise à ce stade des recherches.

On constate donc que la population de sites de brûlage identifiés, pour lesquels des résidus de brûlage furent reconnus et caractérisés, furent majoritairement exploités dans l'entre-deux-guerres pour le déchargement (i) de munitions ex-allemandes et (ii) à chargement chimique. Ne possédant pas une vision exhaustive de l'ensemble des sites de brûlage de Restes Explosifs de Guerre de l'entre-deux-guerres, il est délicat de trancher si les caractéristiques physiques et chimiques de cet ensemble de sites introduisent un biais dans la représentativité de ces terrains de brûlage eu égard à celles de l'ensemble des *Burning Grounds* ou s'ils elles sont réellement représentatives des caractéristiques des terrains de brûlage et reflètent une réalité des opérations de brûlage.

Cette dernière hypothèse est plausible au regard des éléments historiques collectés à la faveur de cette recherche : (i) les munitions ex-allemandes furent rassemblées à la sortie de guerre dans des dépôts spécifiques pour être systématiquement détruites alors qu'une fraction non négligeable de munitions françaises fut rassemblée pour être réfectionnée ou être remise immédiatement en dépôt, et les munitions britanniques, bien connues de l'entreprise F.N. Pickett & Fils, furent majoritairement déchargées par fusion à la vapeur (chargements explosifs) et vidange (chargements chimiques), (ii) les munitions explosives difficilement déchargeables à la vapeur comme celles ex-allemandes, au chargement de piètre qualité, ainsi que les munitions chimiques aussi ex-allemandes, furent préférentiellement brûlées.

On rappelle aussi ici qu'à la fin de la guerre, les munitions chimiques représentaient plus de 30% des arsenaux et, parmi lesquels, au sein de l'artillerie allemande, plus de 20% de munitions à *Croix bleue*. Or, le seul moyen technique de décharger ces engins dans un but de récupérer la ferraille constitutive des *casings* était le brûlage. Les nombreux tessons de fioles d'arsines provenant de ce type de munitions, associés à de fortes teneurs en arsenic, découverts sur de nombreux sites de brûlage (Trélon, Liessies, Rampont, Noire Fontaine, Westroozebeke, Zweedorf) témoignent de l'abondance de munitions à *Croix bleue* dans les dépôts de la fin de la guerre qui furent liquidés. Les munitions chimiques se distinguèrent des explosives car possédant des chargements non valorisables, à éliminer, pour des raisons de sécurité.

Figure 297 : Localisation des sites de brûlage étudiés dans le cadre de la présente recherche.

2. Processus de caractérisation, méthodes et moyens

2.1. RECHERCHES PIONNIERES ALLEMANDES

Les recherches de Bausinger et al, (2005)[1881] sur le site de brûlage de l'usine F.N. Pickett & Fils *B-Factory* de Westroozebeke, puis de Bausinger et al, (2007)[1882] sur celui de la « Place à gaz » apparaissent comme pionnières en ce qui concerne la connaissance des pollutions héritées des activités de destruction à l'échelle industrielle de munitions chimiques de l'entre-deux-guerres faisant appel aux techniques de déchargement par brûlage. Son directeur de thèse, Johannes Preuss, Professeur à l'Université Johannes Gutenberg de Mayence (Allemagne), qui encadrait alors ces recherches, fit aussi figure d'avant-gardiste sur ces questions des pollutions de sortie de Première Guerre mondiale, en menant en Allemagne, pour le compte du Ministère Fédéral allemand de l'environnement, une série d'études, d'abord historiques[1883], puis environnementales, sur les opérations et pratiques d'éradication des surplus de guerre allemands, menées dans le cadre de la démilitarisation de l'Allemagne dans l'entre-deux-guerres, sur d'anciennes usines de destruction en zone occupée (secteur américain, Hallschlag)[1884] et non occupée (Nussau, Zweedorf)[1885]. Ces chercheurs ressource et ces études de référence constituèrent les piliers sur lesquels s'appuie cette recherche, en prolongeant les recherches historiques, les caractérisations, entamées par T. Bausinger en Meuse et en étendant celles, historiques, appliquées en Allemagne par le Pr. Preuss au contexte français. La connaissance de l'extension des résidus de brûlage du site de la « Place à gaz » et des pollutions environnementales qu'ils générèrent, fut approfondie, en élargissant le spectre des paramètres analytiques recherchés au laboratoire, compte tenu des progrès dans le domaine de la chimie analytique sur ces composés, et en investiguant aussi les sols profonds. La poursuite de l'étude historique au sujet des modalités d'exploitation de la « Place à gaz » entamée par T. Bausinger permit *in fine* d'identifier en l'entité de F.N. Pickett & Fils l'opérateur des brûlages sur ce site. Mais en poursuivant ces recherches plus avant, les archives montrèrent que la « Place à gaz », ayant longtemps stigmatisé et cristallisé sur ses pollutions, si visibles, toute la question restée sans réponse de la réalité des séquelles de la Grande Guerre sur notre environnement, n'était qu'un petit site isolé en forêt, aux marges de sites et situations bien plus préoccupants sur le plan environnemental. C'est ainsi que les sites formant le complexe de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt furent (re)découverts. Les enjeux environnementaux et socio-politiques forts associés à ce site et ses pollutions enclenchèrent un processus de diagnostic et d'évaluation des risques rarement conduit sur ce type de sites d'éradication à l'échelle industrielle de munitions anciennes datant de la Grande Guerre. Ces enjeux forts jouèrent tels des tremplins pour accroître les connaissances des pratiques industrielles anciennes, menées dans l'urgence de la sortie de guerre et les nécessités des reconstructions, mais aussi pour savoir comment concilier et intégrer ces traces et leurs nuisances potentielles à un nouvel usage de l'environnement.

[1881] Bausinger T, Preuss J. (2005). *Environmental remnants of the first World War: soil contamination of a burning ground for arsenical ammunition*, *op. cit.*

[1882] Bausinger T, Bonnaire E, Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun, op. cit.*

[1883] Preuß, J., Eitelberg, F., Albrecht, G., Mauder, S., Dehner, U., Laskowsi, S. (2002). Texte 49/2. *Modellhafte Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und -vernichtung nach dem Ersten Weltkrieg*, *op. cit*.

[1884] Preuß, J., Eitelberg, F. (1999). *Hallschlag : historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Preßkörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espagit AG*, *op. cit.*

[1885] Bausinger, T. Communication personnelle, non publié.

2.2. SITES DE LA « PLACE A GAZ » ET DU COMPLEXE DE DESOBUSAGE CLERE & SCHWANDER EN MEUSE. SITES PILOTES DE REFERENCE

Restée en sommeil depuis le début des années 2000, avec la découverte par le BRGM au droit de cette clairière de teneurs très élevées, anormales, en arsenic, l'opportunité d'une évaluation environnementale de la « Place à gaz » fut réactivée en 2014, à l'approche des commémorations du centenaire de la bataille de Verdun. En 2014, le site de la « Place à gaz » fut investigué en profondeur, avec des sondages à la pelle mécanique, et le diagnostic des sols de surface fut finalisé, montrant l'existence de résidus de brûlage débordant largement de la limite physique de la clairière (la tâche centrale). Mais c'est réellement en 2015, avec les diagnostics et les nécessités (i) d'alimenter l'Interprétation de l'Etat des Milieux, (ii) de libérer ou non les séquestres des parcelles agricoles sur les trois entités formant le complexe de désobusage Clere & Schwander, que non seulement la connaissance de l'organisation des terrains de brûlage et de la composition des résidus de combustion s'approfondit, mais aussi que les méthodes et moyens d'acquisition des données permettant de qualifier la typologie des résidus de combustion et des pollutions associées s'affinèrent.

Les sites Clere & Schwander de Noire Fontaine et de Rampont, offrent en effet une opportunité exceptionnelle de confronter (i) les enseignements tirés de l'exploitation des photographies aériennes anciennes (survol de 1922) concernant la position et l'organisation spatiale des tranchées de brûlage, (ii) les pratiques et l'organisation des brûlage visibles sur les clichés historiques au sol (Muzeray, Rampont) et enfin (iii) cent ans après la cessation de l'activité de ces sites de désobusage industriel, les résultats des mesures indirectes (par la géophysique, méthodes géomagnétiques, selon des protocoles analogue à celui mis en œuvre au droit du terrain de pétardement de Vaudoncourt Loison) et les observations directes des sols profonds et résidus de brûlage par des sondages à la pelle mécanique. Il s'agit des sites ayant fait l'objet des diagnostics les plus approfondis, visant la connaissance de l'état des sols, des eaux souterraines, des eaux de surface, des sédiments et de certaines denrées alimentaires végétales (orge, blé, champignons) et animales (lait et viande bovine).

Le terrain de brûlage de la « Place à gaz » fut également investigué en profondeur par la réalisation de sondages à la pelle mécanique. Aucune photographie aérienne ancienne ou vue d'archive au sol ne sont connues pour ce site et aucune investigation géophysique n'y a été menée.

Pour les autres sites de brûlage, les investigations et recherches consistèrent en des observations « naturalistes » de l'état des sols, une collecte et une expertise (aidé par des professionnels du déminage) des éléments de munitions présents au droit des *Burning Grounds* (nature, position et état des éléments), et des analyses des sols de surface avec des densités de points d'échantillonnage variables d'un site à l'autre (selon les accessibilités, les moyens financiers à disposition au moment de l'échantillonnage, etc.). Pour les trois terrains de brûlage de Trélon et Liessies (ancienne usine *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils), la connaissance de l'organisation des terrains de brûlage s'est aussi appuyée sur un jeu exceptionnel de photographies d'archives issues de collections particulières et privées et de relevés GPS au sol des ruines de l'ancienne usine Pickett par des historiens locaux. On rappelle que le Parc Jeannette fit l'objet d'un survol par avion pour l'acquisition d'une imagerie de terrain LiDAR de haute résolution sous le couvert végétal pour identifier, par les empreintes au sol, les principales structures de la *C-Factory* encore conservées de nos jours (cf. Section 10h du volet historique du présent manuscrit).

Pour répondre aux objectifs scientifiques et techniques énoncés en introduction de la présente Section 3e, des protocoles opératoires particuliers durent être mis en œuvre pour acquérir les données par des investigations, doublement contraintes, d'une part par des impératifs de sécurité (investigations pénétratives en environnements pyrotechniques par ailleurs fortement pollués chimiquement) et d'autre part par des objectifs scientifiques et techniques (établir une connaissance la plus exhaustive possible de la nature des polluants, pollutions et résidus de brûlage, et leurs extensions latérales et verticales). Les données environnementales qui enrichissent cette recherche sont le fruit d'un équilibre et de compromis entre des contraintes sécuritaires, scientifiques et techniques et financières.

La démarche de diagnostics suivie, ainsi que les méthodes et moyens mis en œuvre, sont exposés dans ce qui suit. Le processus, faisant appel à toutes les étapes du diagnostic, est décrit pour les sites de brûlage Clere & Schwander de Rampont et Noire Fontaine.

2.3. DEMARCHE DE DIAGNOSTIC DES TERRAINS ET TRANCHEES DE BRULAGE. METHODES ET MOYENS.

Les caractérisations visant les terrains de brûlage de Rampont et de Noire Fontaine suivent un processus progressif, itératif, en plusieurs étapes, similaire à celui sur lequel se basent les diagnostics de sites industriels. Cette démarche conduit d'une connaissance sommaire des sites, de leurs pollutions et de leurs contextes environnementaux, à une connaissance de plus en plus approfondie. Le degré d'approfondissement et l'exhaustivité des diagnostics sont toujours proportionnés aux multiples enjeux des sites et sols pollués : enjeux sanitaires, environnementaux, réglementaires voire socio-politiques.

2.3.1 Analyse historique préliminaire

Un diagnostic débute toujours par une étude historique, essentielle, car elle permet de répondre aux questions (i) quels éléments et substances sont à rechercher par des analyses au laboratoire et/ou sur le terrain, au regard de la composition des produits, matériels et matières utilisés, stockés ou détruits sur ces sites, des pratiques et procédés industriels mis en œuvre, (ii) où investiguer en identifiant les secteurs géographiques où ces usages, stockages et destructions furent opérés.

La nature des composés à rechercher est à définir au regard de la composition des munitions, matières et matériels explosibles et agressifs susceptibles d'avoir été neutralisés sur les sites de brûlage (cf. grille exposée dans la Section 1h du volet historique du présent manuscrit), en considérant aussi par ailleurs les pratiques de déchargement, le brûlage, susceptibles de générer des sous-produits caractéristiques de la décomposition thermique de matières hydrocarbonées (dont font partie les explosifs) et initialement absents des compositions des matériels détruits. Tel est le cas notamment des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF, PolyChloroDibenzo-p-Dioxines & PolyChloroDibenzofuranes) ou bromées (PBDD & PBDF, PolyBromoDibenzo-p-Dioxines & PolyBromoDibenzofuranes) qui font l'objet d'un développement spécifique dans cette Section 3e du présent volet environnemental.

Malgré l'absence de plans des installations Clere & Schwander, cette analyse historique a pu être réalisée au moyen de deux sources historiques exceptionnelles. Il s'agit d'abord des photographies aériennes anciennes datant de 1922 au droit des communes de Spincourt, Vaudoncourt, Muzeray. A noter que les missions de reconnaissance par photographies aériennes (possédant une résolution suffisante pour être exploitées) étaient rares, très localisées, dans l'immédiate sortie de guerre.

Possiblement la mission de 1922 au droit du canton de Spincourt visait précisément la reconnaissance du dépôt de Spincourt et du complexe de désobusage Clere & Schwander. Les tranchées de brûlage forment des structures linéaires parallèles desservies par des voies de chemin de fer étroites caractéristiques sont aisément reconnaissables sur les photographies aériennes (cf. Section 11h du volet historique du présent manuscrit). La seconde source est celle des clichés au sol tirés d'un album (possiblement publicitaire) de collections particulières montrant dans le détail toutes les installations et opérations de désobusage de Clere & Schwander à Rampont. Quelques clichés relatifs aux installations de Noire Fontaine ont aussi pu être récupérés. Ces clichés de très bonne qualité permettent d'interpréter les structures industrielles identifiées sur les photographies aériennes anciennes.

2.3.2 Diagnostic des sols de surface

Identification des polluants « traceurs » caractéristiques

Il s'agit d'une étape cruciale, de prime importance des diagnostics, car ces sols de surface ([0-5 cm] pour les sols non remaniés à [0-40 cm] pour les sols labourés) constituent des milieux d'exposition directe ou des milieux susceptibles de dégrader la qualité de denrées alimentaires. Il convient d'abord de caractériser les cortèges de substance et éléments en présence (en les hiérarchisant si possible en terme d'occurrence, d'amplitudes des teneurs, et de leurs propriétés toxiques et/ou CMR (Cancérigènes, Mutagènes, Reprotoxiques) intrinsèques), au regard des résultats de l'étude historique, mais aussi de l'état des connaissances sur le comportements environnemental (transformation, etc.) des composés en question (cf. Section 2h du volet historique du présent manuscrit).

Nous avons vu dans la Section 2h que les substances constitutives des ergols solides, explosifs et autres toxiques de guerre sont, une fois exposées aux conditions environnementales, réactives et peuvent se transformer en une grande variété de sous-produits au terme de processus réactionnels biotiques ou abiotiques. Ces sous-produits et métabolites sont, si possible, et dans les limites de la faisabilité des analyses, à intégrer au panel analytique à appliquer sur les échantillons de sol et résidus de brûlage pour être conclusif quant à leur composition et/ou degré de pollution. Ainsi, lors de cette première étape du diagnostic des sols de surface, la composition des résidus de brûlage et/ou des sols montrant d'indéniables indices organoleptiques de pollution (aspects, couleurs, etc.), ou encore des sols localisés au droit des installations identifiées sur photographies aériennes anciennes, a été explorée par l'application sur un nombre restreint d'échantillons d'un panel analytique le plus large et exhaustif possible.

Cette exploration peut aussi s'appuyer sur la réalisation de *screenings* de recherche systématique des liaisons organiques par chromatographie en phase gazeuse (CPG) ou en chromatographie en phase liquide à haute résolution (HPLC). Ces analyses qualitatives permettent d'identifier des molécules qui auraient pu échapper aux analyses quantitatives ciblées. Des mesures des teneurs en métaux, métalloïdes et certains éléments furent aussi réalisées sur le terrain au moyen d'analyseurs portatifs par fluorescence X qui permet, de proche en proche et avec un temps de comptage de trois à cinq minutes, d'apprécier rapidement les ordres de grandeurs des teneurs d'un vaste panel d'éléments. Ce type d'analyses fut mis en œuvre à Rampont, Noire Fontaine, et sur la « Place à gaz ».

Circonscrire et cartographier les zones de pollutions concentrées des sols de surface. Modalités opératoires

Une fois ces « traceurs » typique des pollutions bien identifiés, l'étape suivante consiste à circonscrire les zones de pollution concentrée affectant les sols de surface. La réalisation d'un échantillonnage débordant ces zones impactées est aussi nécessaire afin de caractériser, pour les métaux et métalloïdes, le fond géochimique naturel ou anthropisé local.

Des échantillons composites de sol de surface formés de 5 à 10 prises unitaires collectées sur une surface de 3 x 3 m environ, furent constitués selon un protocole décrit dans ce qui précède et recommandé par LfU (2009)[1886].

- Des échantillons composites de 1 à 2 kg furent constitués pour l'analyse sur lixiviats / éluats (avec un rapport liquide / solide de 1 / 1). Ces échantillons furent conditionnés dans des sacs, à l'abri de la lumière, et expédiés dans un délai de cinq jours maximum au laboratoire spécialisé Envilytix GmbH (Allemagne) pour l'analyse des constituants des poudres, explosifs et matières agressives et leurs sous-produits de transformation environnementale. Bien que minorant les teneurs réelles présentes dans les sols (car seule la fraction hydrosoluble est extraite et analysée), cette approche analytique permet de réduire les risques d'effets pépite induits par le caractère discret et particulaire des polluants solides comme les poudres et explosifs. Par ailleurs, cette approche est totalement pertinente dans le cadre d'un diagnostic visant à estimer le potentiel polluant des sols eu égard aux eaux, superficielles et/ou souterraines. D'autres analyses furent pratiquées par Envilytix sur un aliquote de ces échantillons composites après extraction aux solvants (méthanol ou acétonitrile) avec ou sans sonication ;

- Des prises d'échantillon de 100 à 200 g, issues du composite, furent conditionnées dans des flacons en verre brun pour l'analyse par le laboratoire Wessling du COT, des PCDD & PCDF. Ces flacons, entreposés à l'abri de la lumière, furent expédiés au laboratoire dans un délai de cinq jours maximum ;

- Des prises d'échantillon de 100 à 200 g, issues du composite, furent conditionnées dans des sacs en PE (PolyEthylène) pour l'analyse par le laboratoire Wessling des métaux et métalloïdes. Ces sacs, entreposés à l'abri de la lumière, ont été expédiés au laboratoire dans un délai de cinq jours maximum ;

- Des échantillons composites de 1 à 2 kg furent constitués pour l'analyse sur lixiviat standard des anions et cations mobiles par le laboratoire du BRGM. Ces échantillons ont été conditionnés dans des sacs à l'abri de la lumière et expédiés au laboratoire dans un délai de cinq jours maximum.

2.3.3 Diagnostic des sols en profondeur. Détermination des profondeurs des dégradations de la qualité des sols

Une fois les extensions latérales des zones de pollution concentrée bien délimitées, le diagnostic s'est poursuivi par la caractérisation de leurs extensions verticales et la détermination des profondeurs maximales de dégradation de la qualité des sols. Pour cela, des investigations dites « pénétratives » furent nécessaires pour l'acquisition d'échantillons à différentes profondeurs.

[1886] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, op. cit.

Dans le cas des sites de Noire Fontaine et de Rampont, les implantations des sondages de reconnaissance et d'échantillonnage furent définies considérant (i) la connaissance des zones de pollution concentrée en surface, (ii) le tracé des installations industrielles identifiées sur les photographies aériennes anciennes de 1922 et (iii) des résultats d'une exploration géomagnétique depuis la surface.

Explorations indirectes géomagnétiques non pénétratives du sous-sol

Le protocole opératoire retenu pour la cartographie du gradient magnétique vertical des sites de Noire Fontaine (février 2016) et Rampont (septembre 2016) est identique à celui mis en œuvre pour l'exploration géomagnétique du terrain d'explosion de Vaudoncourt Loison (cf. Section 2e du présent manuscrit).

Figure 298 : Prospection géomagnétique effectuée en février 2016 à Noire Fontaine. Traction du charriot par un opérateur géophysicien. Aperçu photographique. (BRGM).

Le charriot équipé des cinq capteurs en ligne fut adapté en septembre 2016 pour l'exploration du site de Rampont par un dispositif de traction en bois chevillé-collé à une chenillette (cf. Figure 299 ci-dessous).

Attelage pendant la semaine du 29/08 au 02/09/2016 (essai de faisabilité)

Attelage en bois chevillé-collé pendant la semaine du 19 au 23/09/2016 (noter le contrepoids à l'avant de la chenillette)

Figure 299 : Adaptation du charriot d'acquisition par l'usage d'un mototracteur chenillé. (BRGM).

Ces cartographies permettent de localiser les secteurs du sous-sol renfermant de fortes densités d'éléments magnétiques, comme les munitions et fragments de munitions dont recèlent les résidus de brûlage. Ainsi, elles offrent potentiellement la possibilité de localiser précisément (les mesures étant couplées à un GPS) les tranchées et terrains de brûlage, mais aussi d'éventuels sites d'enfouissement de restes de guerre.

Sondages à la pelle mécanique

- **Des méthodes et des moyens contraints par des exigences fortes de sécurité**

Les sols furent caractérisés en profondeur depuis des fouilles et fosses ouvertes à la pelle mécanique sur les sites de la « Place à gaz » (à Gremilly) (octobre 2014), de Noire Fontaine (à Vaudoncourt) et de Rampont (à Muzeray) (février 2018) dans le département de la Meuse.

Pour des raisons de sécurité, et afin de se prémunir des risques liés à la découverte fortuite de munitions et/ou de matériels et matières toxiques agressives enfouis, les méthodes de sondages par carottage (au moyen d'une foreuse) furent d'emblée écartées leur préférant des sondages à la pelle mécanique de 20 tonnes, qui offre la possibilité de creuser par petites passes successives, en conservant un visuel sur les sols en cours de creusement et en effectuant à l'avancement une détection magnétique. A Rampont et Noire Fontaine, les nombreux fragments de munitions chimiques ou explosives observés en surface, et la présence locale de fortes densités d'objets géomagnétiques en profondeur, montraient l'occurrence possible d'engins de guerre et/ou de fragments métalliques magnétiques enterrés.

Les sondages furent réalisés jusqu'à 4 m de profondeur au maximum[1887] par une entreprise spécialisée en diagnostic pyrotechnique (CARDEM-Pyro), selon un mode opératoire et un protocole de sécurité / sureté encadré par un Plan de Prévention inspiré de l'Etude Santé au Travail (EST) propre aux chantiers de dépollution pyrotechnique effectués sur les terrains civils. L'EST fut rédigée par CARDEM-Pyro et fut transmise à la DIRECCTE (DIrections Régionales des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi) pour un avis de l'autorité compétente en matière de sureté pyrotechnique (l'Institut des Poudres et Explosifs (IPE)). L'EST était structurée selon le canevas d'une Etude de Sécurité Pyrotechnique soumise au décret 2005-1325 et de ses deux Arrêtés. Ce processus fut suivi pour les investigations sur les trois terrains de brûlage (Rampont, Noire Fontaine et « Place à gaz »), mais revêtit une complexité toute particulière pour le site Clere & Schwander de Rampont à Muzeray du fait d'obligations d'évacuation de la ferme de Rampont durant les opérations de creusement. En effet un périmètre d'exclusion et d'interdiction d'un rayon de 800 m centré sur le chantier fut défini par le Service du déminage de Metz (cf. Figure 300). Toutes les personnes présentes au sein de cette zone devaient la quitter au moment du creusement à l'exception de l'équipe du déminage qui opérait les creusements. L'organisation de ce chantier exceptionnel a été rendu extrêmement complexe par les mesures de sécurité spécifiques à ce type d'investigations pénétratives dans des sols et résidus présentant des risques à la fois chimiques et à la fois pyrotechnique. Les étapes préparatoires de ce chantier sont exposées en Annexe C du présent manuscrit.

L'échantillonnage fut réalisé sur des blocs de terre provenant de la fouille à profondeur voulue et remontés au godet. Chaque sondage fut immédiatement rebouché à la fin du creusement avant d'entamer le suivant. Des mesures de protection individuelles drastiques durent être respectées (protections respiratoires) compte tenu des teneurs très élevées en métaux et substances organiques très toxiques (cf. Figure 301). Les positions des fosses de sondage furent nivelées en x,y,z par un géomètre expert pour être géolocalisées sur plan.

[1887] Maximum autorisé par la portée du bras de pelle mécanisée.

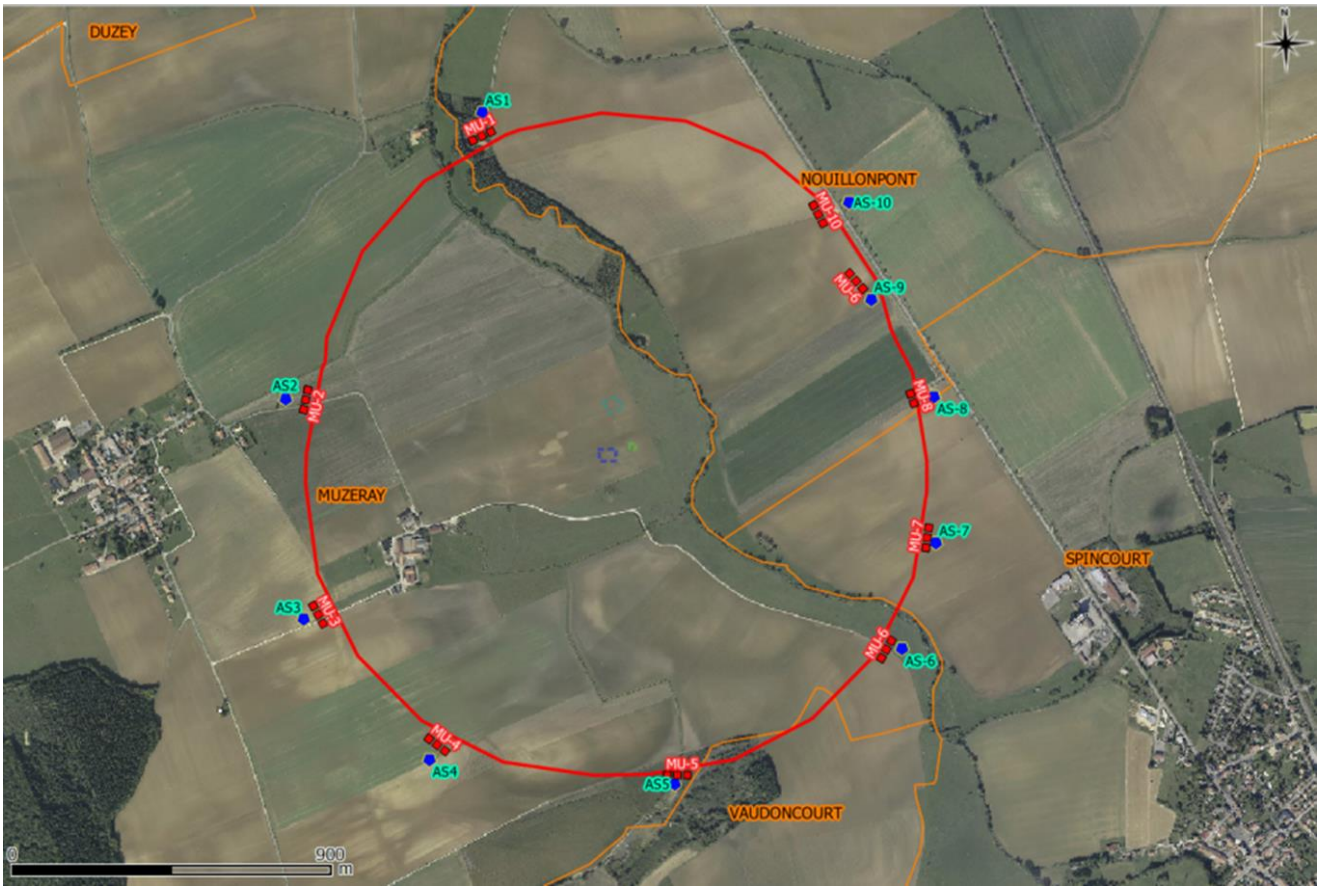


Figure 300 : Zone d'exclusion lors des travaux de creusement des fosses de sondage à la pelle mécanique en février 2018 au droit du site de l'ancienne usine de désobusage Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (département de la Meuse). A noter la présence au sein de ce périmètre de la ferme de Rampont. Les points As désignent la position de personnel de gardiennage[1888].

Sondages au droit de la « Place à gaz », octobre 2014

Sondages à Noire Fontaine, février 2017

Figure 301 : Sondages à la pelle mécanique au droit des terrains de brûlage de la « Place à gaz » (Gremilly) et de Noire Fontaine (Vaudoncourt), département de la Meuse. Mesures de protection individuelles. Aperçus photographiques.

Un protocole sensiblement similaire fut appliqué en octobre 2014 lors des investigations menées au droit du site de la « Place à gaz » en Forêt de Spincourt (cf. rapport BRGM n° RP-65376-FR « *Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55). Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final* » Décembre 2015). mais sans mise en place d'un périmètre d'exclusion, qui fut imposé dans les faits sous la forme de rondes de la Gendarmerie autour du site durant les travaux.

[1888]Extrait de « Hubé, D., Bâlon, P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse) Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final.* BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019 ».

2.3.4 Protocoles analytiques appliqués aux échantillons solides

Plusieurs laboratoires spécialisés furent sollicités pour la réalisation des nombreuses analyses sur les échantillons de sol et de résidus de brûlage collectés sur les terrains de brûlage.

Eléments Traces Métalliques (ETM)

Les Eléments Traces Métalliques (ETM) furent dosés dans les sols par le laboratoire Wessling (Lyon, France) par ICP-MS (spectrométrie de masse à plasma couplée à un spectromètre de masse)[1889] selon la norme NF EN ISO 17294-2"(A)) après minéralisation à l'eau régale (selon le standard MINE NF ISO 11466"(A). Le mercure fut analysé par ce laboratoire suivant DIN ISO 16772(A) après extraction à l'eau régale par spectrométrie d'absorption atomique de vapeur froide ou par spectrométrie de fluorescence atomique de vapeur froide. Les teneurs en ETM des échantillons de sol de surface collectés le 15/07/2014 sur le site de Trélon furent mesurées au laboratoire du BRGM par fluorescence X au moyen d'un appareil portable Niton XL3t800 sur des échantillons séchés à 40°C pendant 4 jours, tamisés à 2 mm et des temps d'analyse de 8 min/échantillon.

Autres composés inorganiques

Pour les nitrates (NO_3^-) et les chlorures (Cl^-) dans les lixiviats (rapports solide / liquide 1/1), les échantillons furent préparés par une filtration à 0.45µm, puis analysés par chromatographie ionique (Dionex) selon la norme NF EN ISO 10304-1 (juillet 2009), après évaluation des aires des pics (laboratoire du BRGM). La détermination de l'azote ammoniacal (NH_4^+, ammonium) s'effectua par analyse en flux (FIA (par injection en flux continu)[1890]) et détection spectrométrique (laboratoire du BRGM). Les dosages des ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-) sur des échantillons de lixiviats filtrés (à 0,45 µm) furent réalisés par le laboratoire du BRGM par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse 2D (tandem MS/MS).

Composés nitroaromatiques

Les NAC polaires et apolaires furent analysés par le laboratoire spécialisé Envilytix GmBH (Wiesbaden, Allemagne) suivant la norme ISO 11916-1 (Qualité du sol — Dosage d'une sélection d'explosifs et de composés apparentés). Il s'agit d'une méthode de dosage utilisant la chromatographie liquide à haute performance (CLHP) avec détection ultraviolet[1891]. Selon les composés recherchés, la méthode HPLC-DAD (chromatographie liquide haute performance couplée à un détecteur à barrette de photodiodes)[1892] a également été utilisée pour le dosage des NAC. Concernant les acides nitrobenzoïques (sous-produits de la transformation abiotique du TNT) et certains autres NAC polaires, les analyses s'inspirèrent des méthodes appliquées pour ces composés dans le cadre du projet européen KORA (HPLC après extraction à l'acétonitrile)[1893].

[1889] *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.*

[1890] *Flow Injection Analysis.*

[1891] *High Performance Liquid Chromatography (HPLC) using an ultraviolet (UV) detector.*

[1892] *High-performance liquid chromatography (HPLC) Diode Array Detector (DAD).*

[1893] *E2-Standartarbeitsanweisung (SAA) zur Bestimmung 12 polaire STV mittel HPLC. Leitfaden. Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei sprengstofftypischen Verbindungen. Prozessverständnis, Methoden, Referenzstandorte, Empfehlung und Hinweise zur Einzelfallbearbeitung.* KORA-Themenverbund 5. Rüstungsaltlasten. Oktober 2008. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Koordination IABG. (

Composés organoarséniés

Les composés organoarséniés des échantillons de sol furent analysés par le laboratoire spécialisé Envilytix par HPLC-DAD (chromatographie liquide haute performance couplée à un détecteur à barrette de photodiodes)[1894], pour l'acide diphénylarsinique et EI-GC / MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse)[1895], pour les triphénylarsine et le 9-phénylarsafluorène, après extraction au méthanol sous champ ultrasonique. Les thianes, les sous-produits de l'*Ypérite* (sulfones, sulfides, sulfures et sulfoxydes) et le chlorobenzène furent aussi analysés par EI-GC / MS. Enfin, les méthodes analytiques suivies par Envilytix pour le dosage des agents aromatiques bromés lacrymogènes et leurs dérivés suivent celles préconisées par l'Organisation pour la Prohibition des Munitions Chimiques (OPCW, *Organization for the Prohibition of Chemical Weapons*).

Dioxines & Furanes

Les analyses sur solides de Dibenzodioxines et – furanes polychlorés (PCDD/F) furent réalisées par le laboratoire Wessling (Lyon) par HRGC-HR MS[1896]. Les résultats comportent l'indication des sommes des homologues Dibenzo-dioxines et - furanes tetra- à hepta-chlorés, des équivalents internationaux (I-TE) selon OTAN/GCMS, des équivalents de toxicité (TEQ) selon OMS 1997 et 2005 et selon BGA, limites de quantification exclues et inclues. Les dioxines et furanes bromées (PolyBromoDibenzo-p-Dioxines et PolyBromo Dibenzofuranes) des sols du site de la « Place à gaz » furent analysés par le laboratoire spécialisé DioxLab par HRGC/HR MS après préparation à l'acide chlorhydrique.

Les méthodes analytiques, les laboratoires sollicités, sont spécifiés pour chaque analyte dans les tableaux placés en Annexe D du présent manuscrit.

2.4. RECAPITULATIF ET SYNTHESE DES ECHANTILLONS ET ANALYSES DE SOLS ET RESIDUS DE BRULAGE REALISES ET EXPLOITES DANS LE CADRE DE CETTE RECHERCHE

Le Tableau 46 présente une synthèse de l'échantillonnage réalisés dans le cadre de cette recherche. Le détail des programmes analytiques par échantillon, pour chacun des sites étudiés, a été rassemblé sous forme de tableaux placés en Annexe D du présent manuscrit. Ces tableaux exposent les panels analytiques appliqués aux sols de surface, ainsi que le nombre d'analyses par site, pour respectivement des extractions aux solvants et des extractions à l'eau (lixiviation). Un tableau expose aussi la liste analytique appliquée aux sols de profondeur ainsi que le nombre d'échantillons analysés pour chacun des paramètres. Sont par ailleurs précisées dans ces tableaux, pour chacune des familles de composés, les techniques et protocoles analytiques appliqués, ainsi que le nom des laboratoires.

Les résultats et nouvelles connaissances exposés dans ce qui suit s'appuient sur plus de 9300 résultats analytiques et presque 500 échantillons de sols de surface, de sols de profondeur et de résidus de brûlage constitués entre 2014 et 2018 (i) à la faveur de cette recherche et des missions d'appui aux politiques publiques (sites de la « Place à gaz », Clere & Schwander de Rampont et Noire Fontaine), (ii) dans le cadre plus spécifique de cette recherche (terrains de brûlage de Trélon et Liessies, de Westroozebeke, de Conteville).

[1894] *High-performance liquid chromatography (HPLC) Diode Array Detector (DAD).*

[1895] *Electron Ionization Gas Chromatography-Mass Spectrometry.*

[1896] *High Resolution Gas Chromatography (HR GC), coupled with High. Resolution Mass Spectrometry (HRMS)*

D'autres résultats (soit environ 1 100 résultats analytiques) furent gracieusement mis à disposition par des chercheurs et collaborateurs allemands afin de compléter les jeux de données (terrains de brûlage des usines F.N. Pickett & Fils *D-Factory* de Westroozebeke et *E-Factory* d'Audruicq et de Zweedorf.

La principale difficulté rencontrée pour l'exploitation de ce nombre considérable de données analytiques est la grande diversité et le grand nombre de paramètres analytiques correspondants aux constituants connus des ergols solides, des explosifs et toxiques de guerre, ainsi que leurs adjuvants, impuretés (généralement des intermédiaires de synthèse), et leurs sous-produits de transformation environnementale biotique et abiotique. Ensuite, les listes analytiques appliquées évoluèrent en fonction de l'état des connaissances des pollutions, méconnu avant l'initiation de cette recherche, et des améliorations des techniques analytiques des laboratoires. Compte tenu de l'hétérogénéité des données, les résultats analytiques de Zweedorf ne seront pas exploités d'un point de vue statistique mais présentés à titre indicatif.

		Clere & Schwander, Spincourt				**"Place à gaz", F.N. Pickett & Fils**		***C-Factory*, F.N. Pickett & Fils**			***B-Factory*, F.N. Pickett & Fils**	**Conteville, F.N. Pickett & Fils**	**Total**
		Noire Fontaine (total)	Noire Fontaine (terrain d'explosion, auréole de projection)	Noire Fontaine (terrains de brûlage, ateliers de déchargement)	Rampont	Tache centrale	Terrain nord	Trélon Parc Jeannette 1	Trélon Parc Jeannette 2	Liessies, Bois l'Abbé	Westroozebeke, Conterdreef	Bois Brûlé	
Sols de surface	Analyses sur éluat	74	25	49	13	20	0	0	0	0	0	0	107
	Analyses après extraction aux solvants	107	23	84	53	29	2	8	8	14	3	6	230
Dates d'échantillonnage		27/01/2015			27/01/2015	15/04/2014		09/07/2014	09/07/2014	27/08/2014	01/06/2017	18/12/2018	-
		18/07/2015			17/07/2015	10-12/06/2014		-	-	-	-	20/02/2023	-
		16/09/2015			16/09/2015	-		-	-	-	-	-	-
		08/11/2016			01/08/2016	-		-	-	-	-	-	-
Sondages, sols de profondeur	Analyses après extraction aux solvants	32	0	32	20	31	5	0	0	0	0	0	88
Dates d'échantillonnage		27/01/2015			27/01/2015	21-23/10/2014		-	-	-	-	-	-
Total		**213**	**48**	**165**	**86**	**80**	**7**	**8**	**8**	**14**	**3**	**6**	**425**

Tableau 46 : Récapitulatif de l'échantillonnage réalisé sur les sites de destruction de munitions par brûlage.

3. *Burning Grounds*. Description et caractéristiques physiques des terrains et résidus de brûlage

3.1. DES TERRAINS DE BRULAGE DIVERSEMENT CONSERVES

Les terrains de brûlage (*Burning Grounds*) sont restés relativement bien conservés en environnement forestier, sites au droit desquels les résidus de brûlage sont encore parfaitement reconnaissables, visibles et accessibles (terrains de brûlage de la « Place à gaz », de Trélon, Liessies, de Conteville, de Zweedorf).

En environnement agricole (terrains de brûlage de Rampont, Noire Fontaine, Westroozebeke, Audruicq), la répartition des polluants initialement introduits dans les sols, et contenus dans les résidus de brûlage, peut être perturbée par le brassage, l'étalement et l'homogénéisation avec les matériaux des sols provoqués par le labour. Les résidus de brûlage restent inchangés sous la profondeur maximale du labour (en général [0-40 cm]).

On rappelle aussi qu'au regard des archives consultées dans le cadre de la présente recherche, des travaux de remise en état des sols post-exploitation des terrains de brûlage figuraient dans certaines clauses des marchés contractés entre les démolisseurs de munitions et l'Etat (Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), sans que ne soit précisé dans ces documents (i) en quoi consistaient ces travaux et (ii) si ces clauses furent respectées ou non et suivies de faits (les conditions réelles de clôture des chantiers de désobusage restant obscures).

3.2. UNE EMPREINTE PAYSAGERE PHYTOTOXIQUE FORTE. BIOINDICATION DE POLLUTIONS SEVERES DES SOLS DE SURFACE AU DROIT DES TERRAINS DE BRULAGE

3.2.1 D'indéniables constats de phytotoxicité

Les pollutions des sols sont dans la grande majorité des cas invisibles. « *Un des problèmes majeurs de la pollution est ici son invisibilité*[1897] », son imperceptibilité. Sans couleur, sans aspect singulier, sans odeur, sans saveur « *La pollution ne se voit pas, donc les gens ne voient pas le danger* [1898]».

Phytotoxicité est le terme employé pour décrire les effets de retard dans la germination, l'inhibition de la croissance et du développement des plantes causés par la présence dans les sols de certains composés chimiques (dénommés phytotoxines)[1899]. La phytotoxicité des résidus de pyrolyse générés par les opérations de brûlage des REG est indéniable. Elle est à l'origine d'une des singularités de ces terrains : le caractère spectaculaire de ces pollutions extrêmes devenant visible dans le paysage par l'absence parfois totale de végétation.

[1897] Van Staëvel, E. (2006). *La pollution sauvage. A chacun ses pollutions*. Presses Universitaires de France. p.33.

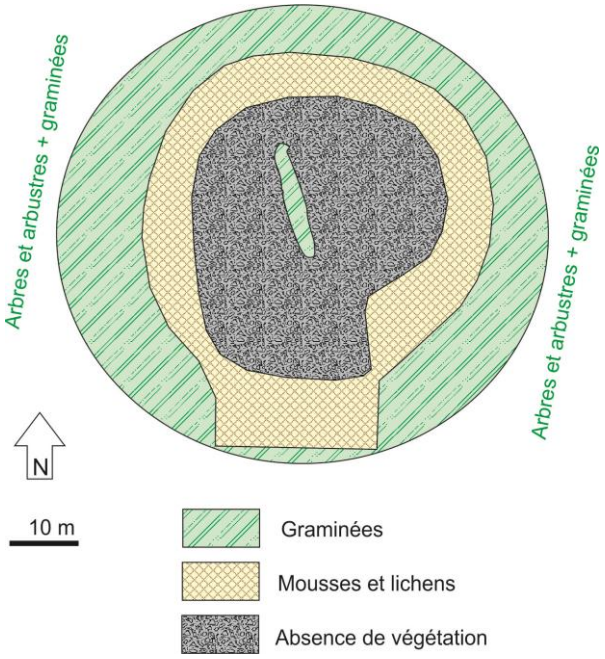
[1898] *Ibid.*

[1899] Blok, C., De Kreij, C., Baas, R. O. B., & Wever, G. (2008). *Analytical methods used in soilless cultivation. Soilless culture, theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, 245-290.

Ces terrains se caractérisent en effet pour la majorité d'entre eux par l'absence totale de couvert végétal au niveau des zones au sein desquelles les plus fortes teneurs en métaux et métalloïdes ont été mesurées. Ces surfaces dépourvues de végétation sont recouvertes de matériels gris noir d'aspect scoriacé, cendreux, mêlés à des fragments métalliques de différentes dimensions parmi lesquels des fragments de fusées et munitions sont parfois encore reconnaissables. Ces zones dénudées de pollutions sévères et concentrées restent d'extension limitée (1 000 m^2 environ pour la « Place à gaz », le terrain de Westroozebeke et le terrain de brûlage du Bois l'Abbé, à quelques centaines de m^2 par ailleurs). Les observations et mesures de terrain semblent indiquer que la phytotoxicité des résidus est essentiellement contrôlée par les métaux et notamment le zinc. Les faibles populations et biodiversité végétales observées sur les franges ou au droit des terrains de brûlage sont des symptômes de l'action d'un stress toxique sur le métabolisme des végétaux imposée par les fortes teneurs en métaux et métalloïdes.

3.2.2 Observations en environnement forestier

En environnement forestier, l'absence de couvert végétal au droit des zones de pollution les plus concentrées se traduit dans le paysage sous forme de clairières. Latéralement, lorsque les teneurs décroissent vers les franges des clairières, certaines espèces végétales peuvent s'installer et proliférer, mais toujours avec une très faible biodiversité (espèces uniques ou un nombre d'espèces très réduit). Seules s'implantent des espèces, robustes et tolérantes aux teneurs élevées en ETM. Parfois encore, comme à Trélon et Liessies, les mousses (bryophytes) s'y développent sans s'ancrer dans le sol, se repliant sur elles-mêmes, formant ainsi d'étonnants coussinets en tapis qui ourlent le pourtour des clairières (cf. Figure 304). Les graminées et petits arbustes s'implantent aussi aux franges des aires de brûlage (cf. Figure 304).



Les premières espèces végétales ayant colonisé les sols aux bordures de la tache centrale de la « Place à gaz » est un bryophyte (*Pohlia nutans*), puis, en s'éloignant de la zone de pollution la plus concentrée, d'autres espèces elles aussi résistantes et primitives réussissent à s'implanter comme les lichens (*Cladonia fimbriata*). et des graminées (*Holcus lanatus*)[1900]. Il s'agit d'espèces végétales tolérantes à l'arsenic et aux ETM. *Holcus lanatus* est réputée pour être capable de développer une résistance aux arsenates[1901] et au zinc[1902]. *Pohlia nutans* est connue pour être tolérante et accumuler des teneurs élevées en cuivre[1903] et est aussi tolérante au cadmium, zinc et plomb[1904]. La zonation et le gradient des teneurs en ETM se traduisent par une zonation concentrique des associations végétales (cf. Figure 302 ci-contre).

Figure 302 : Disposition concentriques des associations végétales sur le pourtour de la « Place à gaz » (d'après Bausinger (2007)[1905]).

Sur certains terrains de brûlage, comme ceux du Bois Brûlé à Conteville (ayant servi de terrain de brûlage d'allumeurs de grenades « œuf » ex-allemandes) et du « dépôt nord » à la « Place à gaz », les végétaux, essentiellement des graminées, des ronciers, semblent avoir développé une tolérance aux polluants (majoritairement le zinc, jusqu'à 130 000 mgZn.kg^{-1} MS) présents dans les sols.

A noter que des recherches (non publiées) furent réalisées en marge de ces présents travaux, afin de caractériser la nature et les densités des consortia bactériens éventuellement présents dans les sols et résidus de brûlage au moyens d'outils performants de biologie moléculaire (Q-PCR après extraction d'ADN, etc.).

[1900] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin. Soutenance le 15 décembre 2016 pour obtenir le grade de Docteur de l'université d'Orléans. *Transfert de polluants inorganiques dans un technosol de brûlage d'armes organo-arséniées soumis à un apport de matière organique et à des cycles de saturation/désaturation : Expérimentation en mésocosme*.

[1901] Meharg, A.A., Macnair, M.R. (1992). *Suppression of the High Affinity Phosphate Uptake System: A Mechanism of Arsenate Tolerance in Holcus lanatus L., Journal of Experimental Botany*, Volume 43, Issue 4, April 1992, Pages 519–524, https://doi.org/10.1093/jxb/43.4.519.

[1902] Rengel, Z. (2000). *Ecotypes of Holcus lanatus Tolerant to Zinc Toxicity also Tolerate Zinc Deficiency, Annals of Botany*, Volume 86, Issue 6, 2000, pages 1119-1126, ISSN 0305-7364, https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1282.

[1903] Helmisaari, H. S., Derome, J., Fritze, H., Nieminen, T., Palmgren, K., Salemaa, M., & Vanha-Majamaa, I. (1995). *Copper in Scots pine forests around a heavy-metal smelter in south-western Finland. Water, air, and soil pollution*, 85, 1727-1732.

[1904] Denayer, FO., Van Haluwyn, C., de Foucault, B. et al. (1999). *Use of bryological communities as a diagnostic tool of heavy metal soil contamination (Cd, Pb, Zn) in northern France. Plant Ecology* 140, 191–201 (1999). https://doi.org/10.1023/A:1009771209869.

[1905] Bausinger T, Bonnaire E, Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun, op. cit.*

Ces recherches montrèrent que certains genres et espèces de bactéries étaient susceptibles de proliférer dans ces environnements extrêmes et toxiques hautement sélectifs, se traduisant par une faible diversité bactérienne et une vraisemblable spécialisation métaboliques des microorganismes. Concernant plus spécifiquement les microorganismes As^{3+}-oxydantes et As^{5+}-réductrices présentes dans les résidus de brûlage de la « Place à gaz », une énumération par la méthode MPN (*Most Probable Number*) et une étude de la diversité des communautés bactériennes est proposée dans Thouin (2006)[1906].

3.2.3 Stress phytotoxiques des végétaux en environnement agricole

Les traces des anciens terrains de brûlage en environnement agricoles sont plus discrètes comme à Zweedorf, Noire Fontaine à Vaudoncourt, Rampont à Muzeray, Audruicq (usine *E-Factory* de F.N. Pickett & Fils) ou encore à Westroozebeke (usine *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils). Les résidus de brûlage furent brassés et mélangés avec des terres naturelles sous l'effet de labours répétés. Comme en environnement forestier, la phytotoxicité des métaux et métalloïdes présents à fortes teneurs dans ces matériaux se manifeste par des atteintes à la libre croissance des cultures (orge, blé, maïs, colza, etc.) et pâtures. Ces aires de brûlage sont alors visibles dans la végétation par des défauts et retards de croissance des cultures (cf. Figure 303). La cartographie des surfaces affectées par ces défauts de croissance permet de délimiter peu ou prou les zones polluées par les résidus de brûlage (bioindication) (cf. Figure 306 et le site de Rampont où ces zones incultes avaient été identifiées dans le cadastre). Ces zones phytotoxiques furent parfois investies par des espèces végétales peu diversifiées, tolérantes voire résistantes (comme la camomille, le plantain, les graminées, etc.), le stress toxique des métaux présents dans les sols se traduisant, comme pour les populations bactériennes, par une forte sélectivité sur les plantes colonisatrices.

Le stress toxique ou la tolérance à l'arsenic furent étudiés sur cinq plants provenant de différentes espèces (*Brassica napus* (Chou à racine de navet), *Plantago major* (Plantain), *Carduus sp.* (Chardon)) collectées au droit des terres agricoles polluées par des résidus de brûlage d'un des systèmes de tranchées Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt (cf. Figure 308 et Figure 312). dans le cadre du projet européen AGRIAS sur le comportement de l'arsenic dans les sols agricoles[1907]. Cette zone échantillonnée présentait la particularité d'être majoritairement marquée par l'arsenic présentant de forts gradients de teneurs. Ces terres étaient aussi particulièrement riches en phosphate comparativement au sol non impactés en arsenic environnants.

Pour cela, la teneur en arsenic total fut dosée dans les feuilles des différents plants ainsi que les acides gras linoléiques (C18:3) par GC-FID (chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur par ionisation de flamme) comme décrit dans Le Guedard et al. (2008)[1908]. Cet acide gras est péroxydé (peroxydation des lipides ou encore la peroxydation lipidique ou lipoperoxydation) lorsque les plantes sont exposées à des composés phytotoxiques.

[1906] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit.*

[1907] Battaglia-Brunet, F., Le Guédard, M., Lions, J., Joulian, C., Devau, N., Charron, M., Hubé, D., Hellal, J. *Characterization of an agricultural site historically polluted by the destruction of arsenical chemical ammunition from the Great War.* AgriAs project "Evaluation and management of arsenic contamination in agricultural soil and water", 2017-2019. http://newprojects.gtk.fi/AgriAs/. Communication orale, congrès As 2018, Péking.

[1908] Le Guedard, M., Schrauwers, B., Larrieu, I., Bessoule, J.J., (2008). *Development of a biomarker for metal bioavailability: the lettuce fatty acid composition. Environ. Toxicol. Chem*. 27, 1147–1151. https://doi.org/10.1897/07-277.1.

Une décroissance des teneurs en acides gras linoléiques (C18:3) dans les plantes par rapport à celles mesurées dans des plants similaires mais non exposées (indice « Oméga 3 ») est un indicateur de stress provoquée par les polluants présents dans les sols. Ces mesures sur ces plants montrent que *Brassica napus* est sensible, intolérant à l'arsenic, que le chardon est tolérant et qu'il accumule l'arsenic dans ses feuilles tandis que le plantain n'accumule quasiment pas l'arsenic. La phytotoxicité de l'arsenic est bien réelle mais ne se manifeste pas chez toutes les espèces autochtones.

3.2.4 La dégradation de la qualité des végétaux et céréales par le transfert sols - plantes

Sur cette même parcelle, un échantillonnage composite des plants céréaliers sur pied (orge) fut réalisé en 2015 par des prises unitaires aléatoires réparties sur un cheminement en « W »[1909]. L'échantillon a été homogénéisé et divisé ensuite en parts égales avant l'analyse au laboratoire. Cet échantillonnage, mené selon ce protocole agronomique, visait à s'assurer de la représentativité de l'échantillonnage et des résultats analytiques à l'échelle de la parcelle[1910]. Une vaste gamme de composés chimiques fut recherchée au laboratoire en considérant les résultats des caractérisations de la chimie des sols de surface réalisées par le BRGM dans le cadre du diagnostic environnemental préliminaire à l'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM). Le détail de ces investigations (méthodes, moyens et résultats) est rassemblé dans le rapport intitulé « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». Ont été recherchés au laboratoire selon différentes méthodes (standards ou spécialement développées pour les besoins de l'étude) spécifiques à chaque famille de composés, décrites dans Gorecki et al., (2017) (i) les éléments traces métalliques dont As, Cd, Pb, Zn, (ii) les NAC (TNT, DNT) et leurs métabolites (ADNT), (iii) les chlorures de diphénylarsine, l'acide diphénylarsinique, la triphénylarsine, (iiii) les ions perchlorate, (iiiii) le tétrabromométhane et le bromure de vinyle. Les Analyses furent réalisées par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris (LCPPP). Ces analyses montrent l'occurrence dans l'orge d'acide diphénylarsinique (jusqu'à 23 $\mu g.kg^{-1}$) et de triphénylarsines (∑triphénylarsine + oxyde de triphénylarsine) (jusqu'à 0,87 $\mu g.kg^{-1}$). Ces composés ont été « phytoextraits » du sol et transférés via le système racinaire vers les parties aériennes de la plante et en particulier la partie comestible (épis). Ce transfert conduisit les autorités à proscrire l'usage agricole au droit de zones de pollution concentrées à Noire Fontaine. Ce phénomène de transfert sol – plante sélectif de certaines substances et éléments a aussi été observé à la « Place à gaz » sur des champignons (Trompettes des Morts, *Craterellus cornucopioides*) cueillis en bordure de la clairière et en dehors du périmètre pollué (échantillon témoin de référence) en septembre 2014. Ces analyses (cf. Tableau 47 ci-dessous) attestent d'une accumulation préférentielle du plomb depuis le sol par ce champignon comestible.

Elément	Unité	Teneur (champignon clairière)	Teneur (champignon témoin hors zone polluée)
Zinc (Zn)	mg/kg^{-1} MS	28	22
Arsenic (As)		3,9	<3
Plomb (Pb)		**40**	<10

Tableau 47 : Résultats analytique sur des échantillons de Trompettes des Morts cueillis au droit et aux abords de la clairière de la « Place à gaz », septembre 2014.

[1909] Belp B.R. (1986). *Evaluation of field sampling techniques for estimation of disease incidence. Am. Phytopathological Soc.*, 76 (12) (1986). pp. 1299-1305.

[1910] Gorecki, S., Nesslany, S., Hubé, d., Mullot, J.U., Vasseur, P., Marchioni, E., Camel, V., Noël, L., Le Bizec, B., Guérin, T., Feidt, C., Archer, X., Mahe, A., Rivière, G. (2017). *Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War. Science of The Total Environment.* Volumes 599–600, 1 December 2017, Pages 314-323.

Figure 303 : Burning-grounds, aperçus photographique a) Clairière de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) montrant le terrain noir, scoriacé et dépourvu dans sa partie centrale de végétation, b), c) terrains de brûlage du Parc Jeannette, usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (département du Nord), d) terrain de brûlage du Bois l'Abbé, usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Liessies (département du Nord), e) sols agricoles (plantés d'orge) pollués par des tranchées de brûlage au droit des ateliers de destruction Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse) affectant la croissance des plants d'orge, f) emplacement d'un terrain de brûlage à Zweedorf (Mecklenburg-Poméranie, Allemagne) inhibant la croissance des plants de Colza[1911]**.**

[1911] Preuss, J. (2001), non publié. Communication personnelle.

Figure 304 : Phytotoxicité des résidus de brûlage, aperçus photographiques a) Terrain de brûlage du Bois l'Abbé, usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Liessies (département du Nord). développement de coussinets de mousses[1912], b) Idem, terrain de brûlage du Parc Jeannette, usine C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (département du Nord)[1913], c) terrain de brûlage du Bois l'Abbé, le gradient du développement des végétaux (graminées et mousses) reflète le gradient des teneurs en métaux des sols, d) clairière de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) montrant une gradation dans le développement des végétaux en fonction des teneurs en métaux dans les sols (absence de végétaux, puis développement des mousses, puis des graminées, puis d'arbustes avant de laisser se développer les grands arbres[1914], e) emplacement d'un terrain de brûlage à Zweedorf (Mecklenburg – Poméranie, Allemagne) inhibant la croissance des plants de blé[1915], f) résidus de brûlage de munitions chimiques à Zweedorf (Mecklenburg-Poméranie, Allemagne) inhibant la croissance des végétaux ; seules mousses et graminées se sont installées sur ces matériaux.

[1912] Hubé, D. (2018).

[1913] Hubé, D. (2014).

[1914] *Ibid.*

[1915] Preuss, J. (2001), non publié. Communication personnelle.

Figure 305 : Marquage de la végétation (cultures) par la pollution des sols au droit de l'ancienne aire de brûlage de l'usine B-Factory de F.N. Pickett & Fils à Westroozebeke / Poelkapelle (Flandre occidentale, Belgique), a) vers 1950, b) Vers 2000[1916], c). d) résidus de brûlage et fioles d'arsines d'obus à Croix bleue de calibre 77 mm calcinées dans les sillons du champ de pommes de terre[1917], e) défaut de croissance du maïs au droit de l'ancienne aire de brûlage d'obus chimiques[1918]. A noter que la pomme de terre est réputée accumuler l'arsenic. A noter aussi en a) en bas à droite le terrain d'explosion exploité par le déminage belge (SEDEE).

[1916] Stichelbaut, B. (2007), non publié. Communication personnelle.

[1917] Hubé, D. (2017).

[1918] Bausinger, T. (2004), non publié. Communication personnelle.

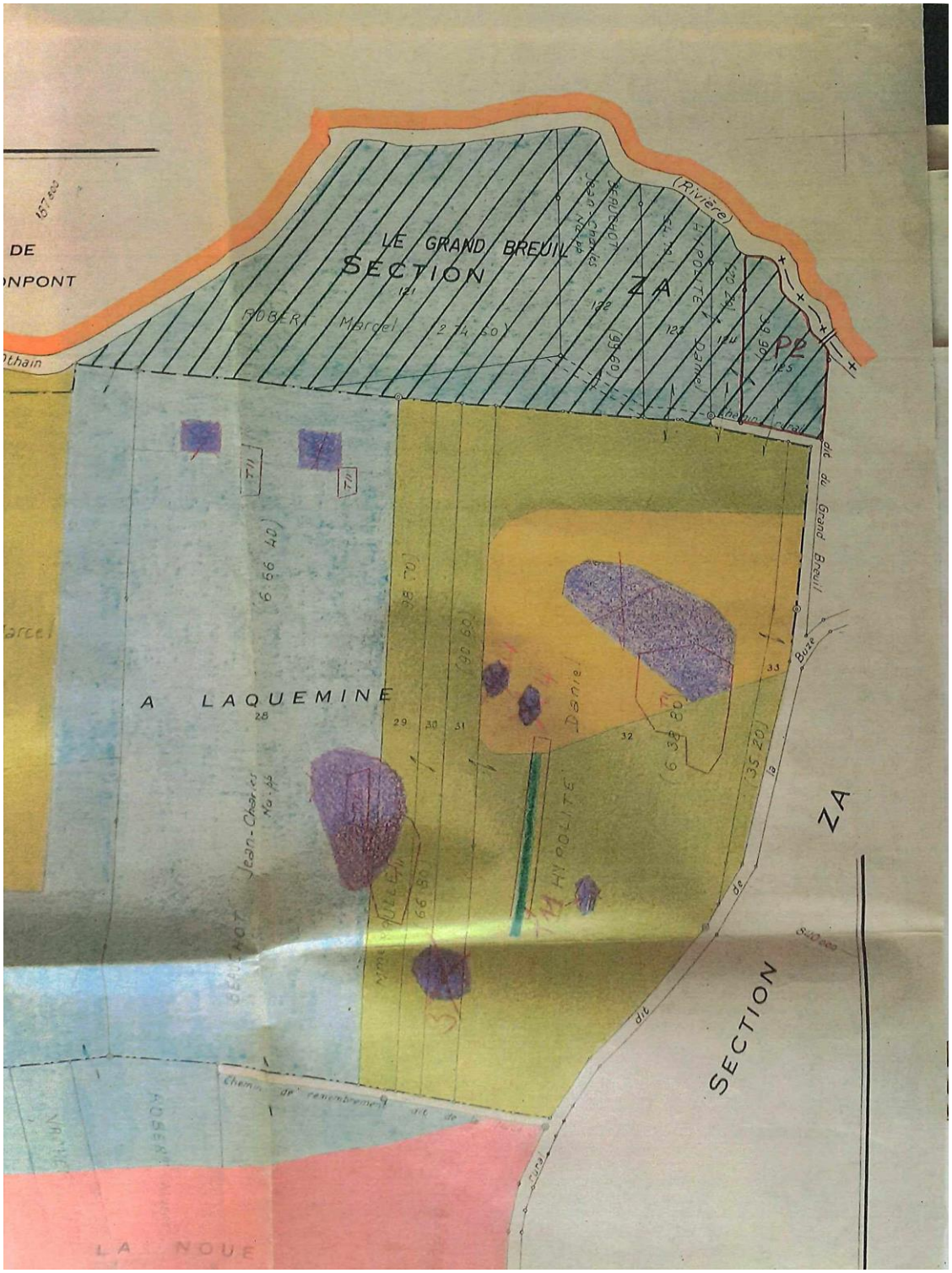


Figure 306 : Zones incultes (en violet) reportées dans le cadastre au droit du site de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (en date de 1997)[1919].

[1919] Direction Départementale des Territoires de la Meuse. Communication personnelle.

3.3. RECONNAISSANCES INDIRECTES ET/OU DIRECTES DES RESIDUS ET DES TERRAINS DE BRULAGE. MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE

3.3.1 Design des *Burning Grounds*

La neutralisation des Restes Explosifs de Guerre par le feu a généralement été opérée sur des terrains de brûlage (*Burning Grounds*) spécialement aménagés. Trois designs de terrain et dispositifs de brûlage furent identifiés à l'issue des investigations et caractérisations de terrain.

Systèmes de tranchées creusées dans le sol (Burning Trenches)

Le premier design était celui des systèmes de tranchées creusées à faible profondeur dans le sol (de 0,5 à 0,75 cm au regard des observations de terrain, cohérentes avec les indications d'archives), disposées parallèlement, dont les longueurs étaient variables (5 m au sein de l'usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray, à possiblement au moins une dizaine de mètres comme à Noire Fontaine, Vaudoncourt). De telles tranchées furent recoupées par les sondages à la pelle mécaniques à la « Place à gaz » en octobre 2014 (cf. Figure 315), à Rampont (second système de brûlage) et à Noire Fontaine (sous les couches de labour) en février 2018 (cf. Figure 312).

Les sondages à Rampont et Noire Fontaine furent positionnés après (i) repérage des tranchées sur orthophotographies aériennes anciennes et (ii) cartographies géomagnétiques exploratoires au sol, pratiquées selon des méthodes et protocoles identiques à ceux retenus pour l'exploration du terrain d'explosion de Vaudoncourt Loison. Au moins deux systèmes de tranchées sont visibles au droit des anciennes installations de désobusage de Noire Fontaine sur le cliché aérien de 1922[1920] (cf. Figure 311), puis par l'exploration géomagnétique réalisée par le BRGM en février 2016. Les tranchées apparaissent comme des anomalies géomagnétiques figurées en noir, attestant du caractère magnétique des résidus de brûlage et/ou des éléments de munitions qu'ils renferment. Les trois tranchées parallèles globalement orientées nord-est / sud-ouest semblent se terminer à leurs extrémités sud-ouest par des puits. Le second système comprend six tranchées parallèles desservies par des voies de chemin de fer étroites qui se dirigent vers des installations (bâtiments). La nature et les fonctions de ces installations ne sont pas connues. Il pourrait s'agir d'ateliers de désamorçage, une opération nécessaire préalablement au brûlage des corps des engins et/ou d'ateliers de perçage et vidage des munitions chimiques à chargement liquide, des installations qui existaient à Noire Fontaine au regard des rares photographies d'archives concernant ce site (cf. Section 11h du présent manuscrit). En effet, les archives collectées dans le cadre de cette recherche font état de pratiques de brûlage d'obus chimiques vidés afin de débarrasser le métal des ultimes égouttures. Ces tranchées font de l'ordre de 25 m de long.

Les tranchées identifiées par l'exploration géomagnétique au droit de l'ancienne usine de Rampont (commune de Muzeray) (anomalie géomagnétique A7 de la Figure 312) ne sont pas clairement visibles sur le cliché de 1922[1921] (cf. Figure 313). Elles sont au nombre de quatre et apparaissent nettement plus courtes que celles de Noire Fontaine, de l'ordre de 5-6 m et espacées d'environ 2 m.

[1920] Cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018 (1).

[1921] Cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0016 (2).

Tranchées hors sol (Burning Trenches)

Parfois encore, les tranchées n'étaient pas ouvertes dans le sol mais matérialisées, bordées, par des rails de chemin de fer (premier système de brûlage de Rampont, actuel « dépotoir » de la Figure 314) ou des merlons de terre (cf. Section 11h du présent manuscrit, avec le site de Mézidon-Canon dans le département du Calvados). Ce design de terrain de brûlage est décrit dans les archives et aurait été mis en œuvre notamment pour la neutralisation de fusées d'artillerie et de projectiles de petits calibres.

Les terrains de brûlage de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils de Trélon et Liessies auraient été exploités selon un tel dispositif au regard des observations de terrain (absence de surépaisseurs significatives des résidus de brûlage) et de certaines photographies provenant de fonds d'archives privés. Les tranchées auraient été bordées au moins sur un de leurs côtés par des murs pare souffle fait de l'empilement de milliers d'obus de gros calibres déchargés (cf. Figure 307).

A Rampont, le cliché aérien ancien de 1922 montre au droit du « dépotoir » un système formé de six tranchées parallèles desservies, selon un schéma analogue à celui de Noire Fontaine, par des voies étroites convergeant vers des installations (cf. Figure 311).

Figure 307 : Tranchée de brûlage hors sol au Parc Jeannette (C-Factory de F.N. Pickett & Fils à Trélon (Nord) bordée par un mur pare souffle fait d'obus déchargés. Non daté, possiblement vers 1921-1922[1922].

[1922] Collection particulière. Communication personnelle. Non daté.

Puits et fosses de brûlage (Burning Pits)

Les explorations géomagnétiques (septembre 2016) (cf. Figure 308) puis les sondages de reconnaissance à la pelle mécanique (2018) réalisés au droit des anciennes installations de destruction de munitions Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt mirent en évidence l'existence d'une vaste dépression d'environ 15 x 15 m, limitée à sa base vers 1,8 m de profondeur, par des couches calcaires massives du Bathonien (formation de la Dalle d'Etain), et comblée de résidus cendreux de brûlage et de macroéléments métalliques, ferrailles en tout genre (dont de nombreuses « queues de cochon ») (cf. Figure 313). Cette structure n'est pas visible sur les clichés aériens de 1922[1923]. Il s'agit possiblement une large fosse de brûlage dans laquelle furent précipités des restes des ateliers Clere & Schwander de Noire Fontaine.

Une fosse (dénommée « fosse nord-est ») d'environ 5 x 5 m a été identifiée au nord-est de la clairière centrale de la « Place à gaz » ; elle est comblée de résidus de pyrolyse noirs avec de nombreux tessons de fioles d'arsine et de bouchons en verre sur 50 à 80 cm d'épaisseur (un obus calciné a aussi été dégagé de cette fosse) (cf. Figure 315). Les résidus reposent sur un horizon sablo-argileux rouge brique très humide sur 20 cm d'épaisseur puis des limons argileux jaunes à gris, avec des passées de couleur rouille, jusqu'à 1,2 m de profondeur. Un reste de plancher fait de rondins et planches en bois a été reconnu à la base des horizons oxydés rouge brique. Cette couche « rubéfiée » présente à la base de la fosse est teintés par les oxydes fer. Il s'agit d'un faciès caractéristique des terrains ayant subi un choc thermique et une élévation forte de la température. Cette fosse a possiblement servi pour le brûlage. Les analyses au laboratoire des résidus de cette fosse montrent que des projectiles et/ou chargements bien particuliers y ont été neutralisés (lacrymogènes bromés allemands).

Aménagements préparatoires des aires de brûlage

Les sols naturels sur lesquels reposent les résidus de combustion du site de la « Place à gaz » semblent avoir été localement sommairement aménagés par un lit de concassé calcaire (cf. Figure 318) ou de laitier de haut-fourneau (aire de brûlage du dépôt nord de la « Place à gaz »), une caractéristique et spécificité sur ces terrains de brûlage tardifs (1926-1928) qui n'a pas été reconnue par ailleurs sur les autres terrains, notamment les plus anciens comme à Trélon et Liessies (1920). Quelles étaient les intentions des opérateurs en aménageant ces sols n'est pas explicité dans les archives, mais il est connu que l'apport de calcaire augmente le pH des sols et réduit la mobilité des métaux et métalloïdes, des composés d'explosifs et neutralise les acides émis par la combustion. L'hypothèse d'une intention de protection de l'environnement se pose.

3.3.2 *Burning Grounds*. Affleurement de déchets industriels dangereux

La surface des terrains de brûlage étudiés dans le cadre de cette recherche ne constitue en rien des sols au sens géologique et pédologique du terme. La toxicité extrême des matériaux qu'elle renferme annihile tout processus d'évolution naturelle de pédogénèse et d'assimilation à l'environnement naturel. Ces résidus forment *in fine* une couche de déchets dangereux générés par des procédés industriels de neutralisation et déchargement d'engins chimiques et conventionnels, par la combustion à l'air libre (*Open Burning*) de Restes Explosifs de Guerre. Cette dimension de couche de déchets est particulièrement explicite à la vue des coupes de sondages au droit de la « Place à gaz ». On ne peut donc pas parler pour ces sites de pollutions des sols mais de déchets dangereux susceptibles de polluer à leur contact les sols naturels, puis tous les milieux environnants.

[1923] Cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0017 (1).

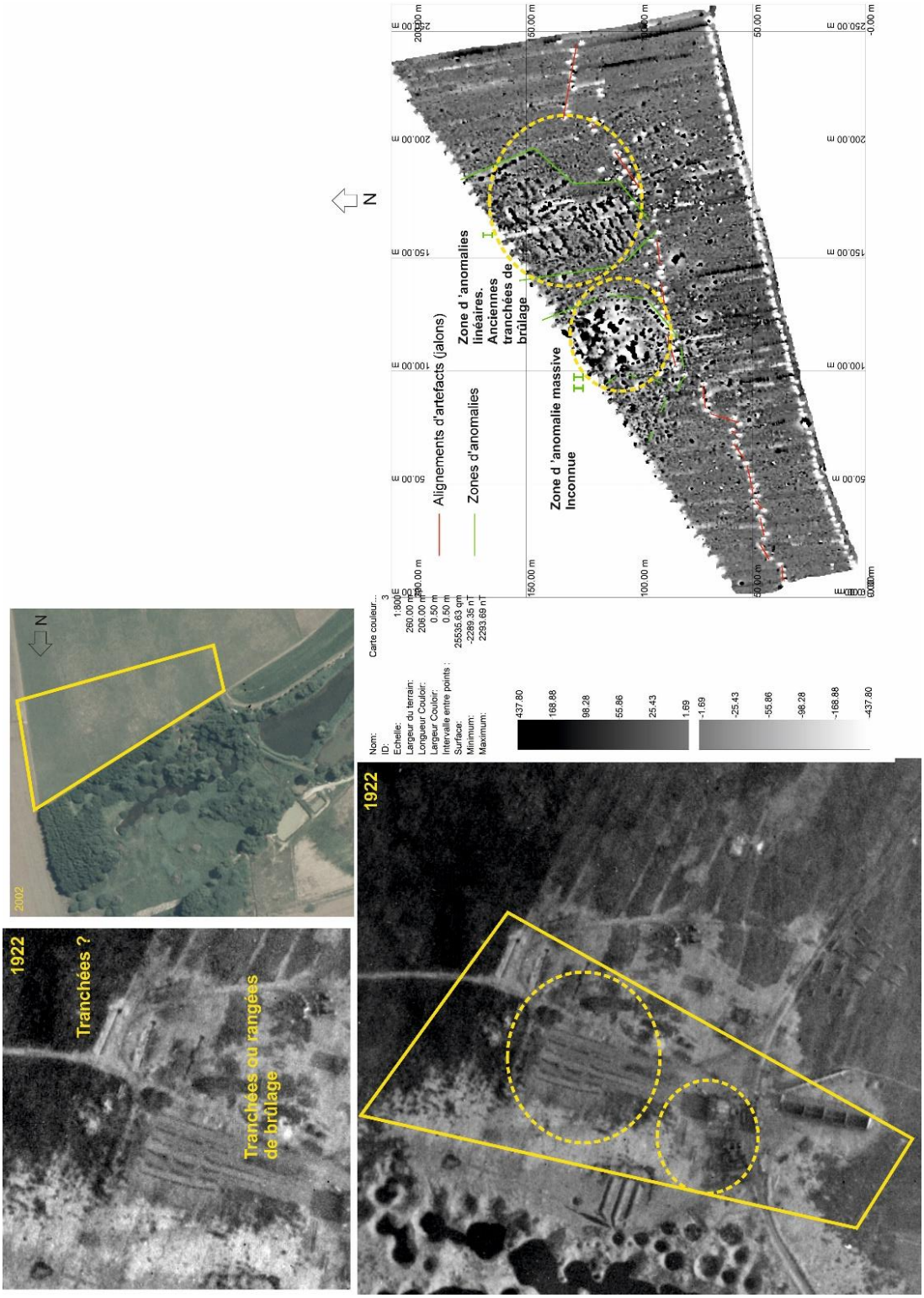


Figure 308 : Systèmes de tranchées de brûlage mis en évidence sur photographie aérienne ancienne (1922) et par exploration géomagnétique au sol (BRGM, février 2016) au droit des anciennes installations de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt)[1924].

[1924] Hubé, D. (2016) et extraits du cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001.

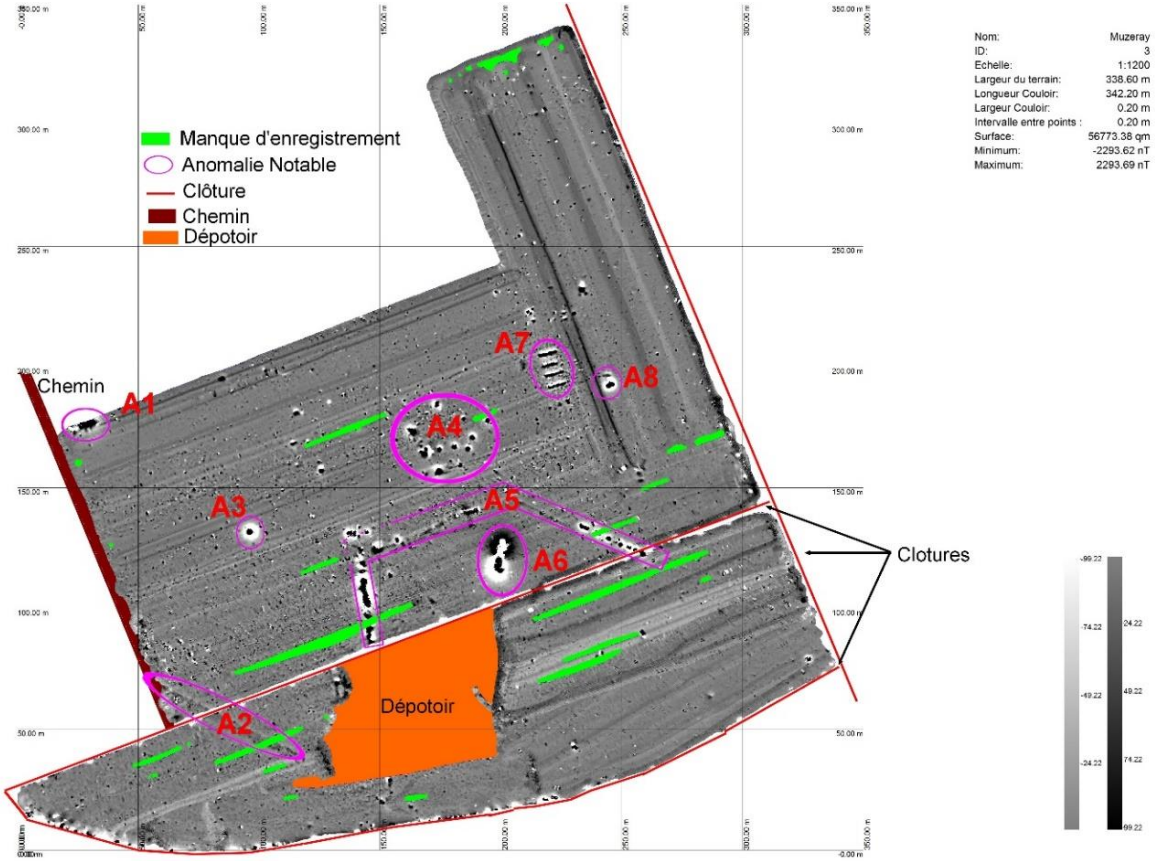


Figure 309 : Systèmes de tranchées de brûlage (anomalie A7) mis en évidence au droit de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont (commune de Muzeray) par exploration géomagnétique au sol (BRGM, septembre 2016).

Figure 310 : Systèmes de tranchées de brûlage au droit de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont. Aperçu de photographie aérienne ancienne (1922).

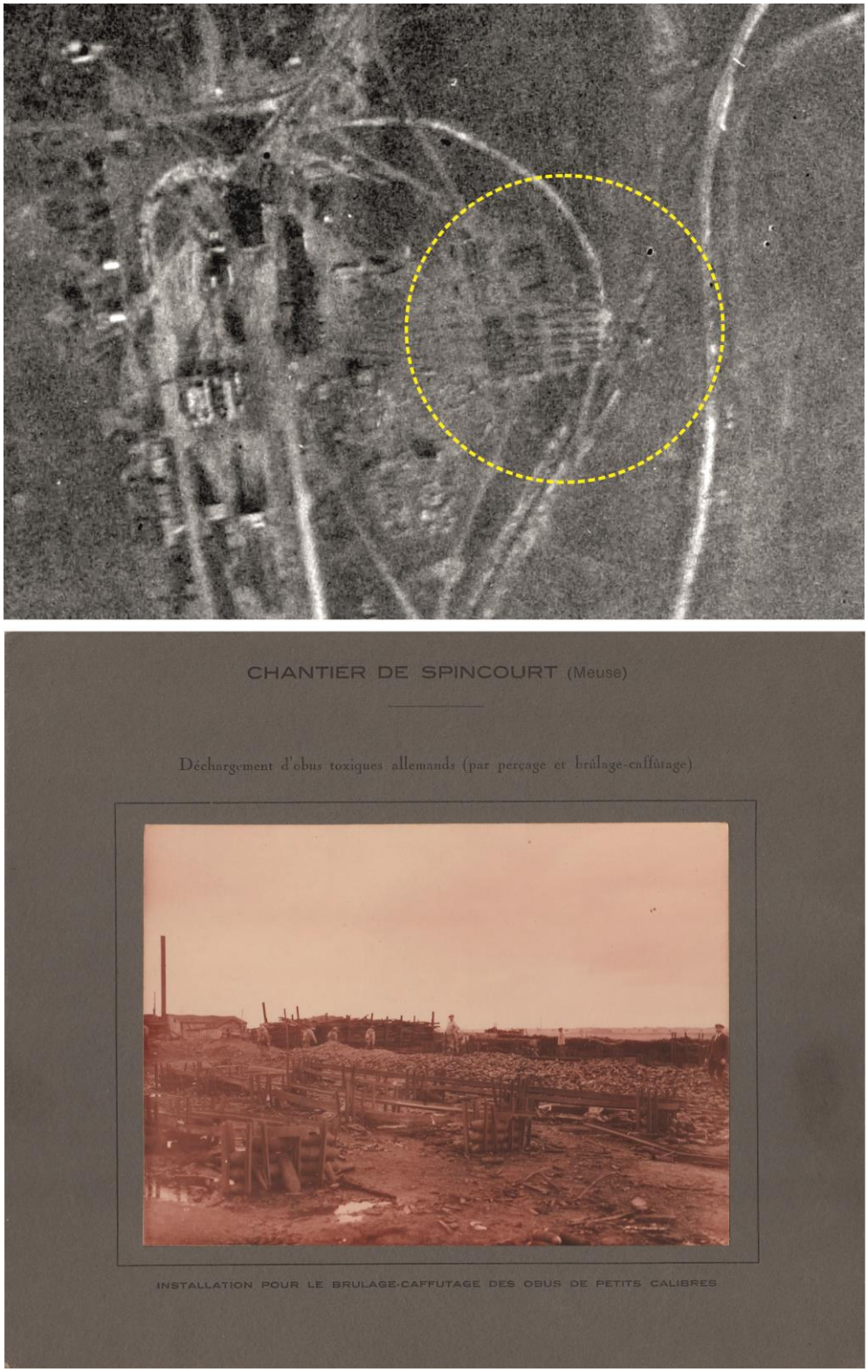
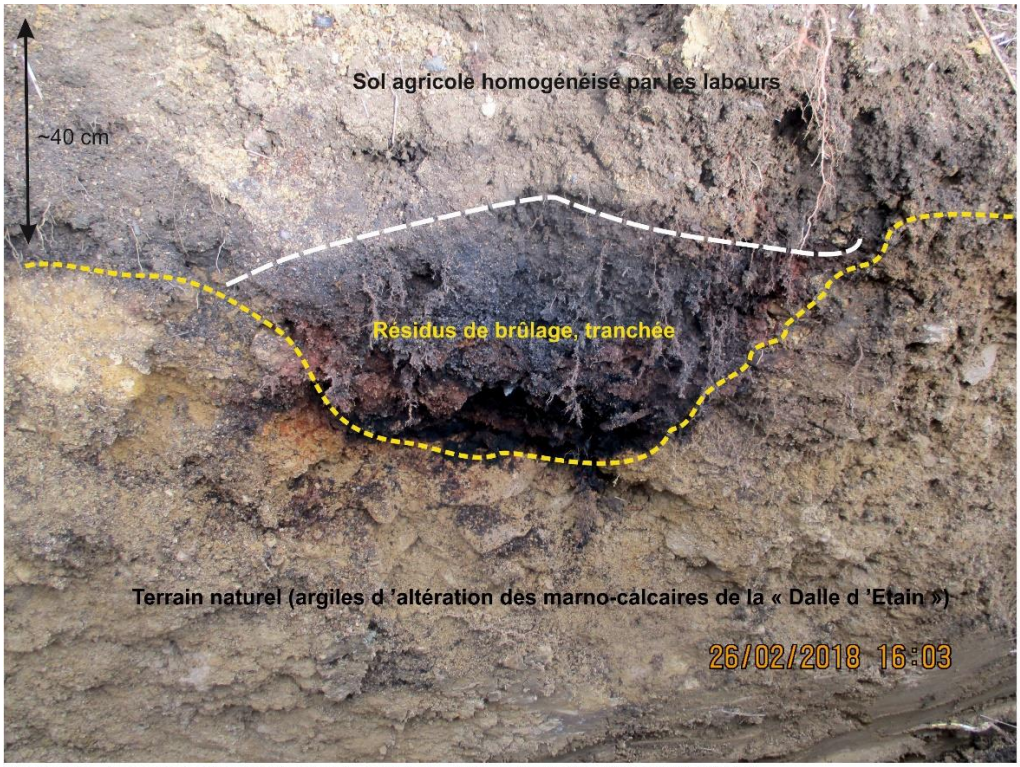


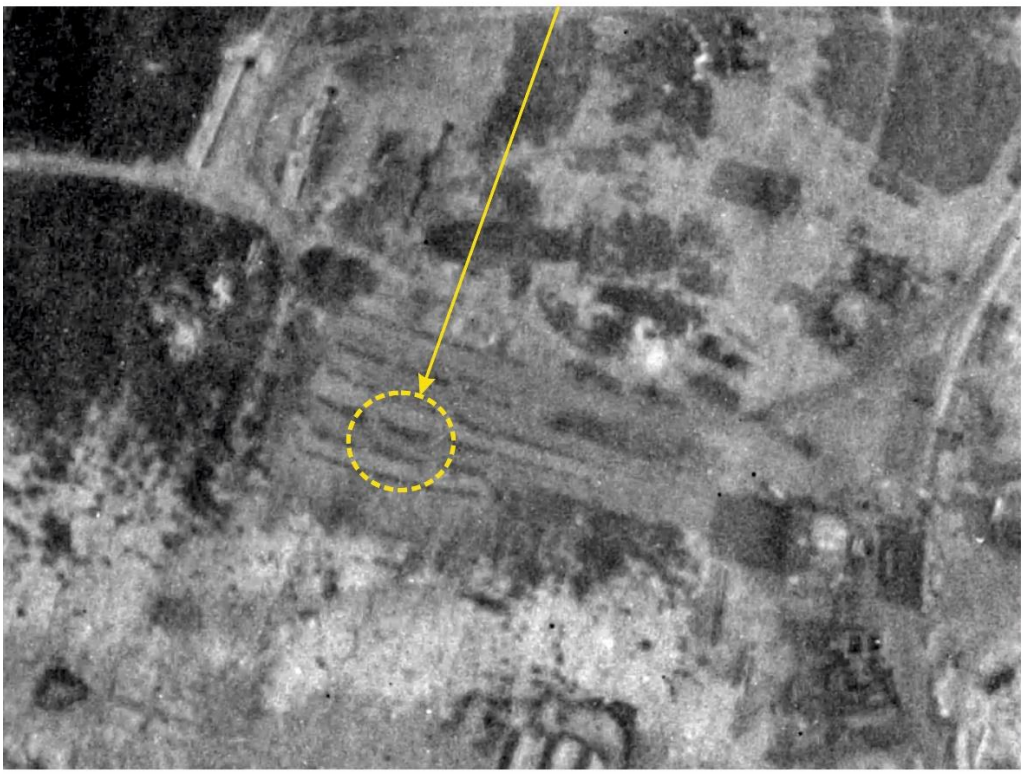
Figure 311 : Aire de brûlage de l'usine Clere et Schwander de Rampont. Préparation d'une tranchée de brûlage d'obus d'artillerie de campagne. Orthophotographie de 1922[1925] et cliché au sol (non daté)[1926]. A noter les personnages à l'arrière-plan transportant du bois en prévision d'un brûlage et équipés de vêtements couvrants en cuir huilé, et d'appareils respiratoires Tissot. Ces équipements de protection individuels attestent que ce personnel s'affairait à la neutralisation de munitions chimiques.

[1925] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001

[1926] Collection particulière. E. Hanotin. Communication personnelle. Non daté.



Tranchée de brûlage recoupée par le sondage à la pelle mécanique NF-PM05



Localisation approximative (fond orthophoto 1922).
Cliché IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018 (1). Extrait

Figure 312 : Tranchée de brûlage recoupée par le sondage à la pelle mécanique NF-PM-5 au droit d'un des systèmes de tranchées de brûlage du site de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt, Meuse). Ce profil laisse apparaître les résidus de brûlage sous la couche brassée par les labours, parcourus par les systèmes racinaires et montrant une coloration rouge typique de l'oxydation thermique[1927].

[1927] Hubé, D. (2018).

Figure 313 : Fosse ou puits (d) comblé de résidus cendreux, scories (a) et macroéléments métalliques (b,c). Sondages à la pelle mécanique au droit du site de désobusage Clere & Schwander à Noire Fontaine (Vaudoncourt) (février 2018)[1928].

[1928] Hubé, D. (2018).

Figure 314 : Le site de brûlage de munitions chimiques de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse). Localisation et aperçu photographique satellitaire.

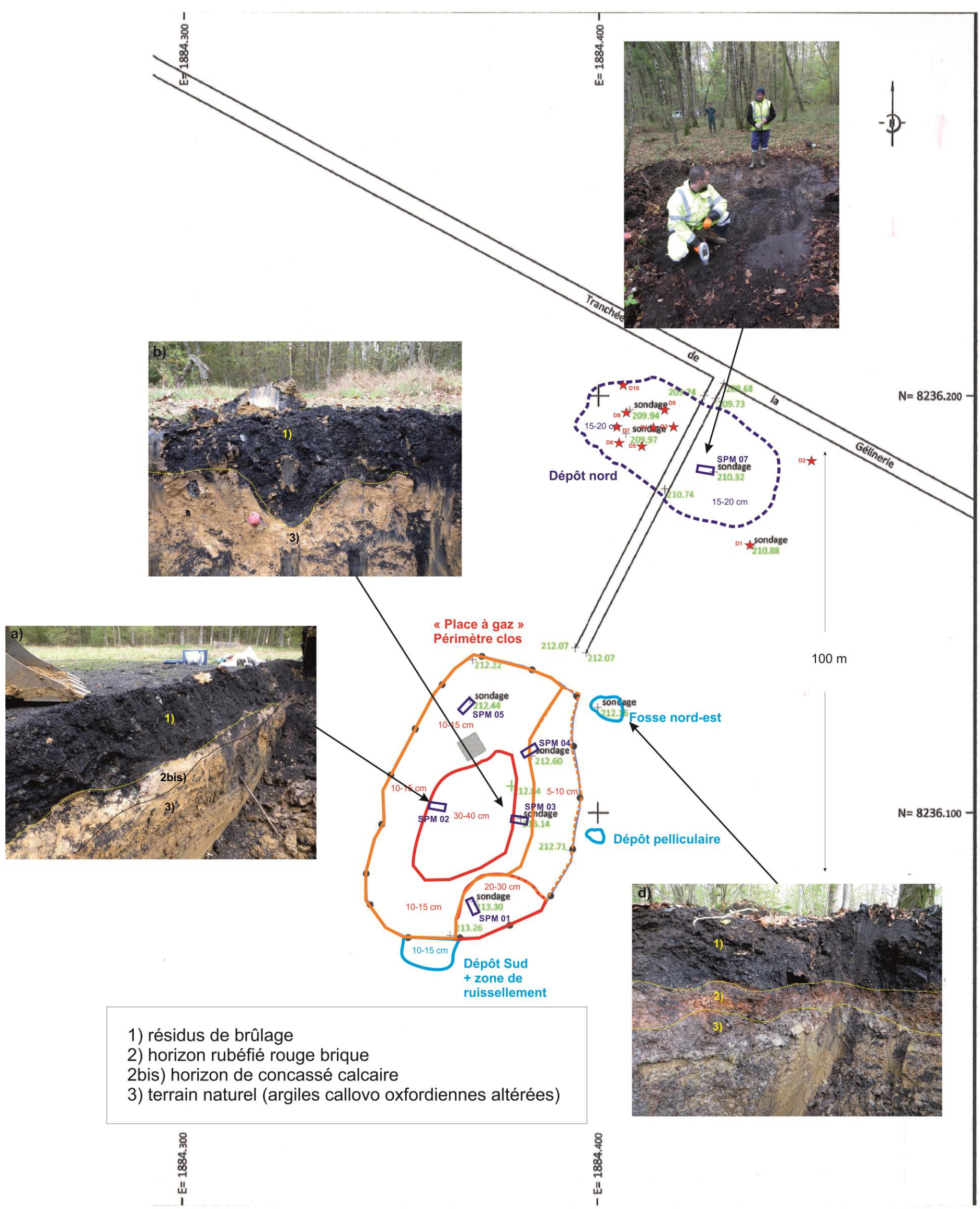


Figure 315 : Aires de brûlage et dépôts de résidus de combustion de la « Place à gaz », comme de Gremilly (département de la Meuse) (octobre 2014). Aperçus photographiques et extension des dépôts (indication des épaisseurs approximatives en cm), sur fond topographique coté (en m NGF).

3.4. LES RESIDUS DE BRULAGE, TYPOLOGIE ET ELEMENTS PHYSIQUES CONSTITUTIFS

3.4.1 Epaisseurs, extensions

Les superficies de ces terrains de brûlage ne sont pas clairement connues car ce qui est aujourd'hui visible en surface sont les résidus issus de ces opérations (de l'ordre de 1 000 m^2 à la « Place à gaz » et du même ordre sur les autres chantiers de F.N. Pickett & Fils visant des engins chimiques comme à Westroozebeke). Ces résidus peuvent être pelliculaires (de l'ordre du centimètre comme au droit de la zone « dépotoir » à Rampont ou au Parc Jeannette à Trélon) pouvant atteindre jusqu'à 75-80 cm d'épaisseur (tranchées et fosse de la « Place à Gaz » (cf. Figure 315)), mais généralement de quelques centimètres à dizaines de centimètres. Lors d'épisodes de fortes pluies, et pour les résidus déposés sur des sols argileux (« Place à gaz », Trélon et Liessies), une saturation en eau a été observée à la base des dépôts de résidus.

3.4.2 Description de deux typologies de résidus

Les résidus de brûlage apparaisent toujours comme des matériaux hétérogènes.

Deux types de résidus furent identifiés : (i) les dépôts de résidus autochtones, c'est-à-dire déposés au droit des terrains de brûlage à l'endroit où ils furent générés et (ii) des dépôts de résidus allochtones, qui auraient été déplacés depuis le terrain de brûlage vers leur périphérie.

Cette seconde catégorie correspond aussi à un type bien particulier de résidus. Ces dépôts sont noirs, d'aspect gras, luisant et moiré, très riches en tessons en verre vert de fioles d'arsines d'obus à *Croix bleue* de tous calibres (77 mm courts et longs, 105 mm et 150 mm). Des fioles d'arsine vidées mais intactes et de très nombreux bouchons (en verre vert, bleu ou en porcelaine) ont aussi été découverts sur certains sites dans ce type de résidus. Ce qui motiva leur déplacement n'est pas renseigné dans les archives. Une hypothèse plausible peut être avancée. Les archives, témoignages de Michael Kostevitch et des inspecteurs des munitions attestent de combustions incomplètes des obus à *Croix bleue* et de leurs chargements en arsine. Il est possible que ces fioles partiellement calcinées aient été réservées et déplacées sur un terrain où elles furent éventuellement brisées et leur contenu d'arsines mis à brûler.

Les dépôts autochtones sont généralement constitués de matériaux granulaires hétérogènes gris souris à noir, d'aspect scoriacé à cendreux, localement rougeâtre en lien avec la présence d'oxydes de fer générés durant la combustion, pris dans une matrice sableuse et renfermant localement, (i) comme à Trélon et Liessies (cf. Figure 317) une très forte densité de fragments et d'éléments de munitions et fusées (ressorts, percuteurs, masselottes, rondelles, etc.), clous, charnières de caisses à munitions, bouchons obturateurs ou encore (ii) comme à la « Place gaz », Westroozebeke ou au Bois l'Abbé, de très nombreux tessons en verre vert de fioles d'arsine ayant appartenu à des projectiles à *Croix bleue* ex-allemands de calibre 77 mm courts et longs, 105 mm et 155 mm. Des fragments pluri centimétriques de munitions et fusées (« caffût ») ont aussi été découverts sur certains sites.

A Conteville, les résidus de brûlage du Bois brûlé s'avèrent particulièrement riches en allumeurs, oxydés, calcinés, typiques des grenades allemandes « œuf ». Il s'agit du seul type d'éléments de munitions découvert dans ces résidus.

A Trélon (terrain de brûlage principal n°2 du Parc Jeannette), des grenades à manche allemandes, partiellement fondues, soudées par une résine, prises en masse, ont été découvertes (cf. Figure 317). On rappelle ici que ces terrains de brûlage datent du début des années 20 et de la période durant laquelle Pickett expérimenta, possiblement à Trélon, ses méthodes de brûlage pour convaincre les autorités françaises, britanniques puis belges de la pertinence de ses méthodes. Une autre découverte insolite fut celle d'une fiole d'obus à *Croix bleue* de 77 mm long fendue et renfermant encore son chargement d'arsines solides (cf. Section 1e du présent manuscrit et Figure 316). Les analyses au laboratoire démontrent que ces arsines étaient partiellement oxydées en acide diphénylarsinique. Cette fiole n'aurait donc pas été brûlée. On rappelle ici que pour extraire une fiole intacte des obus à *Croix bleue*, elle doit être retirée des explosifs dans lesquels elle était noyée. Cette fiole n'a pas été retirée par fusion des explosifs lors de la combustion. Elle l'a été soit par fusion à l'eau chaude ou à la vapeur des explosifs soit mécaniquement.

Deux indices semblent rendre cette dernière hypothèse plausible. Le premier est la découverte à proximité de cette fiole, d'autres fioles intactes mais vidées associées à de très nombreux fragments centimétriques (*chunks*) d'explosifs nitrés proches du TNT. Ensuite, toutes ces fioles présentaient au culot (tourné vers l'œil ogival des obus) une cassure conchoïdale comme celle obtenue sur du verre par un coup sec. Le retrait de fioles par l'action mécanique de marteaux et burins (en bronze ?) ne peut être exclu. Peut-être s'agit-il là d'expérimentations pratiquées par Clere & Schwander.

La nature des éléments constitutifs des résidus de brûlage semble être directement en lien avec la nature des engins qui ont été neutralisés. L'observation fine de ces éléments constitutifs des résidus permet d'identifier, avant même d'avoir fait appel aux analyses chimiques, que certains terrains de brûlage s'étaient spécialisés dans la neutralisation de certaines catégories de munitions selon un principe de spécificité prôné par Michael Kostevitch : à chaque type de munitions, une procédure de destruction selon un design adapté.

Figure 316 : Résidus de brûlage de matériels explosifs et toxiques ex-allemands. Aperçus photographiques a) Fioles d'arsine en verre vert mises à l'affleurement de la fosse de brûlage nord, site de la « Place à gaz », b) fiole d'arsine visible dans un sillon d'un champ de pomme de terre, Conterdreef, site de Westroozebeke, c) sols de surface de la « Place à gaz » montrant des résidus de brûlage mêlés aux laitiers de haut fourneaux des ballasts de chemin de fer, d) Fioles d'arsines vidées d'obus de 77 mm courts et longs, Westroozebeke, e) idem, avec des fioles de 77 mm long, Noire Fontaine ; celle du bas est encore chargée du toxique de guerre oxydé, f) résidus de brûlage riche en allumeurs de grenades allemandes au Bois Brûlé à Conteville (Somme), g) le sol de surface est constellé de tessons de verre vert (Trélon, Parc Jeannette).

Figure 317 : a), b) Zooms sur les résidus jonchant le Burning Ground du Parc Jeannette n°2, Trélon de la C-Factory de F.N. Pickett & Fils. Des rondelles, fragments de ressorts, masselottes d'éléments de fusées sont reconnaissables, c) restes de grenades à manches allemandes partiellement calcinées et fusionnées en masse par une résine de composition et d'origine inconnue, d), e) résidus de brûlage d'engins allemands à Zweedorf. En e) des goulots de fioles d'arsines sont aisément reconnaissables attestant de la liquidation sur ce terrain du brûlage d'obus à Croix bleue[1929].

[1929] Preuss, J (2001), non publié, *op. cit*.

3.4.3 Phases minérales des résidus de la « Place à gaz ». Des indicateurs des processus de combustion

L'observation au sein des résidus (i) de fioles en verre vert partiellement (ramollissement) ou totalement fondues, (ii) de faciès rouge brique riches en oxydes de fer typiques de matériaux ayant subi des élévations significatives de températures, sont des indices d'évidence que des procédés thermiques à haute température furent mis en œuvre sur ces sites et impliquant des munitions. On note que la fenêtre de fusion du verre est située entre 1 400 et 1 800°C. Les foyers de brûlage devaient donc atteindre au moins, ponctuellement et localement, ces gammes de température.

Thouin (2016) [1930] démontre, à la faveur de son doctorat, sur la base d'observations texturales et d'analyses minéralogiques sur les grains constituant les résidus de brûlage de la « Place à gaz » que la nature des phases minérales porteuses et leurs habitus sont directement hérités (i) des différents stades des processus de combustion des matériaux métalliques, des chargements organoarséniés et (ii) de la composition chimique des éléments calcinés. Des caractérisations minéralogiques et texturales des grains des résidus de brûlage furent réalisées. L'observation minéralogique combinait l'imagerie optique à la binoculaire et celle au microscope électronique à balayage (*Scanning Electron Microscope* (SEM)). Ces observations permirent d'identifier trois types de phases : (i) phases minérales amorphes, (ii) phases minérales cristallisées et (iii) phases carbonées (charbon de bois) (cf. Figure 318).

Durant la combustion, les composés organoarséniés chlorés se décomposent en HCl, H_2O, CO_2, As_2O_3 (oxyde d'As^{3+}) et As_2O_5 (oxyde d'As^{5+}). Ces oxydes possèdent à très haute température une volatilité élevée[1931] et de fait sont susceptibles d'avoir été émis par les foyers actifs, pour potentiellement retomber sous les vents avec leur refroidissement. Mais compte tenu de la présence concomitante de l'arsenic (As) avec d'autres métaux (notamment le cuivre (Cu), le zinc (Zn), présents dans les éléments constitutifs des munitions), la montée en température des foyers de combustion puis leur refroidissement, se traduisirent par une recombinaison (néoformation) de l'arsenic avec les métaux sous forme d'espèces et phases minérales cristallisées ou amorphes.

Des minéraux, principalement des arséniates de cuivre, de zinc furent en effet identifiés. L'arsenic As^{5+} (de l'ion arséniate AsO_4^{3-}) proviendrait de la décomposition des arsines et de l'oxydation de l'arsenic As^{3+}, tandis que le cuivre et le zinc seraient issus des alliages Al, Cu, Zn (riches en cadmium) formant les fusées d'artillerie allemandes typiques de la fin de la guerre. Thouin (2016) identifia les espèces minéralogiques secondaires suivantes[1932]: l'Adamite ($Zn_2AsO_4(OH)$), l'Olivénite ($Cu_2AsO_4(OH)$), la Na-Pharmacosidérite ($NaFe_4(AsO_4)^3(OH)_5\ 5H_2O$) et la Ba-Pharmacosidérite ($BaFe_4(AsO_4)^3(OH)_5\ 5H_2O$). Un oxyde de zinc a aussi été identifié (Zincite (ZnO)) dans la fraction sableuse la plus grossière.

[1930] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit.*

[1931] Vehlow, J., Birnbaum, L., Koppel, W. (1997). *Arsen and Antimon in der Müllverbrennung. Abfallwirtschaftsjournal*. 1997 ; 9 :9 – 19.

[1932] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit*. p. 75.

Les phases amorphes constituent un premier indicateur que les résidus furent portés à haute température tandis que les micro craquelures affectant ces phases témoignent de processus de retrait lors du refroidissement. Les structures en microbilles présentent aussi des similitudes morphologiques avec celles observées dans certaines cendres volantes d'incinérateurs (Fisher et al., 1978[1933], Le Forestier et al., 1998[1934]).

Les faciès zéolitiques aciculaires, radiés et fibro-radiés des arséniates secondaires (comme les Pharmacosidérites) sont aussi décrites par certains auteurs dans les cendres issues d'incinérateurs (Shigemoto et al., 1993[1935], Murayama et al., 2002[1936], Querol et al., 2002[1937]). La Zincite (ZnO) identifiée dans les résidus de brûlage de la « Place à gaz » est un minéral secondaire synthétique typiquement présent dans les résidus métallurgiques de haut-fourneaux.

D'après Bausinger (2007)[1938], As, Pb et Zn seraient aussi liés à des phases Fe (oxydes et hydroxydes de fer), au regard des extractions sélectives (au moyen d'une solution de NH_4NO_3) réalisées sur les résidus de brûlage de la « Place à gaz ». Une fraction importante des masses de ces éléments serait présente dans la fraction adsorbable et échangeable des sols. Il démontre par ailleurs que la mobilité des éléments métalliques est bien corrélée avec le pH, tandis que la mobilité de l'arsenic serait indépendante du pH. Le Zn serait le métal le plus mobile dans les sols. Enfin, la richesse des résidus de brûlage en oxyhydroxydes de fer, de manganèse (issus des *casings* des munitions calcinées), en particules charbonneuses, reposant sur des sols argileux (pseudogleys), forment un réservoir susceptible de retenir fortement les métaux et limiter leur mobilité. Toutefois, les teneurs en métaux mobiles présents dans les résidus de brûlage sont telles (> 100 $g.kg^{-1}$ MS) que les sites de sorption des sols et résidus sont saturés, expliquant pourquoi des teneurs anomaliques en arsenic sont encore mesurées à plus de deux mètres de profondeur.

La spéciation est la forme chimique sous laquelle se présente un élément dans l'environnement. La spéciation définit l'état de valence et/ou les états de complexation des éléments chimiques, métaux et métalloïdes. En géoscience, la notion de spéciation a une portée plus générale : il s'agit de l'association des métaux et métalloïdes (cations ou anions) avec les différentes phases porteuses du sol (matrices) qui, selon les ions, influe sur la distribution (localisation) de ces derniers au sein ou à la surface des phases porteuses. De la spéciation dépendent (i) la mobilité, (ii) la toxicité des ETM. Les analyses en spéciation sur les matrices solides des sols et résidus de brûlage sont pratiquées selon des protocoles (d'extraction chimiques sélectives, de désorption thermique par palier, etc.) propres aux différents éléments. Les analyses en spéciation sont généralement réalisées sur l'arsenic (As^{3+}/As^{5+}), le chrome (Cr^{3+}/Cr^{6+}), le mercure.

[1933] Fisher, G.L., Prentice, B.A., Silberman, D., Ondov, J.M., Biermann, A.H., Ragaini, R.C., and McFarland, A.R. (1978). *Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. Environmental Science and Technology* 12, 447 – 451.

[1934] Le Forestier, L., and Libourel, G. (1998). *Characterization of flue gas residues from municipal solid waste combustors. Environmental Science and Technology* 32, 2250-2256.

[1935] Shigemoto, N., Hayashi, H., and Miyaura, K. (1993). *Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. Journal of Materials Science* 28, 4781 – 4786.

[1936] Murayama, N., Yamamoto, H., and Shibata, J. (2002). *Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. International Journal of Mineral Processing* 64, 1 – 17.

[1937] Querol, X., Moreno, N., Umaña, J., Alastuey, A., Hernández, E., López-Soler, A., and Plana, F. (2002). *Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. International Journal of Coal Geology* 50, 413 – 423.

[1938] Bausinger T, Bonnaire E, Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun, op. cit.*

Ces analyses coûteuses se justifient en général pour évaluer la mobilité de ces éléments. Elles ne visent en général qu'un nombre restreint d'échantillons. L'analyse de la spéciation de As dans le sol le plus pollué du site de la « Place à gaz » (clairière, tache centrale) a été réalisée par le laboratoire UT2A de Pau, par ICP-MS après extraction dans l'acide phosphorique aux micro-ondes[1939]. Les résultats de cette analyse sont les suivants :

- As^{5+} : 70 178 $mg.kg^{-1}$;
- As^{3+} : 1 577 $mg.kg^{-1}$;
- Autre espèce polaire non déterminée : 1 956 $mg.kg^{-1}$.

Ce résultat est cohérent avec l'ICP-MS réalisée à Nancy qui indiquait 72 820 $mg.kg^{-1}$ d'As total dans le sol. L'As^{3+} (espèce réduite) ne représente que 2 % de l'As total, cependant la valeur absolue de la teneur de cette espèce réputée plus mobile que l'As^{5+} (espèce oxydée) est très élevée.

Cette analyse confirme les résultats analytiques de Bausinger (2007)[1940] et de Thouin (2016)[1941] identifiant que As était essentiellement présent dans ces résidus sous forme d'arséniates (AsO_4^{3-}). Aucune autre analyse en spéciation n'a été effectuée sur les échantillons fortement marqués par les ETM dans le cadre de cette recherche.

3.4.4 Matières récupérées ?

S'il ne fait aucun doute que les brûlages opérés dans l'entre-deux-guerres étaient destinés à produire de vieilles ferrailles inertes pouvant être récupérées en toute sécurité pour être vendues, écoulées vers des filières sidérurgiques, la question se pose du devenir des fioles et tessons de fioles en verre vert. En effet, les obus à *Croix bleue* furent déchargés par millions. Or, aucune « décharge » ou dépôt enfoui constitué d'amas de verre n'a été découvert au regard des informations disponibles à ce stade de la recherche, avec en creux la question restée en suspens, de ce que sont devenues ces masses considérables de verre à l'issue des démolitions des engins à *Croix bleue*. Auraient-elles aussi été redirigées vers des filières de recyclage et valorisation, à Trélon par exemple, où la région possède une longue tradition verrière ?

[1939] Une autre méthode pour les solides, moins facilement accessible mais plus précise, est l'EXAFS (spectroscopie EXAFS (*Extended X-Ray Absorption Fine Structure*) qui est une technique d'analyse de spectrométrie d'absorption des rayons X utilisant principalement le rayonnement synchrotron.

[1940] Bausinger T, Bonnaire E, Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun*, *op. cit.*

[1941] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit.*

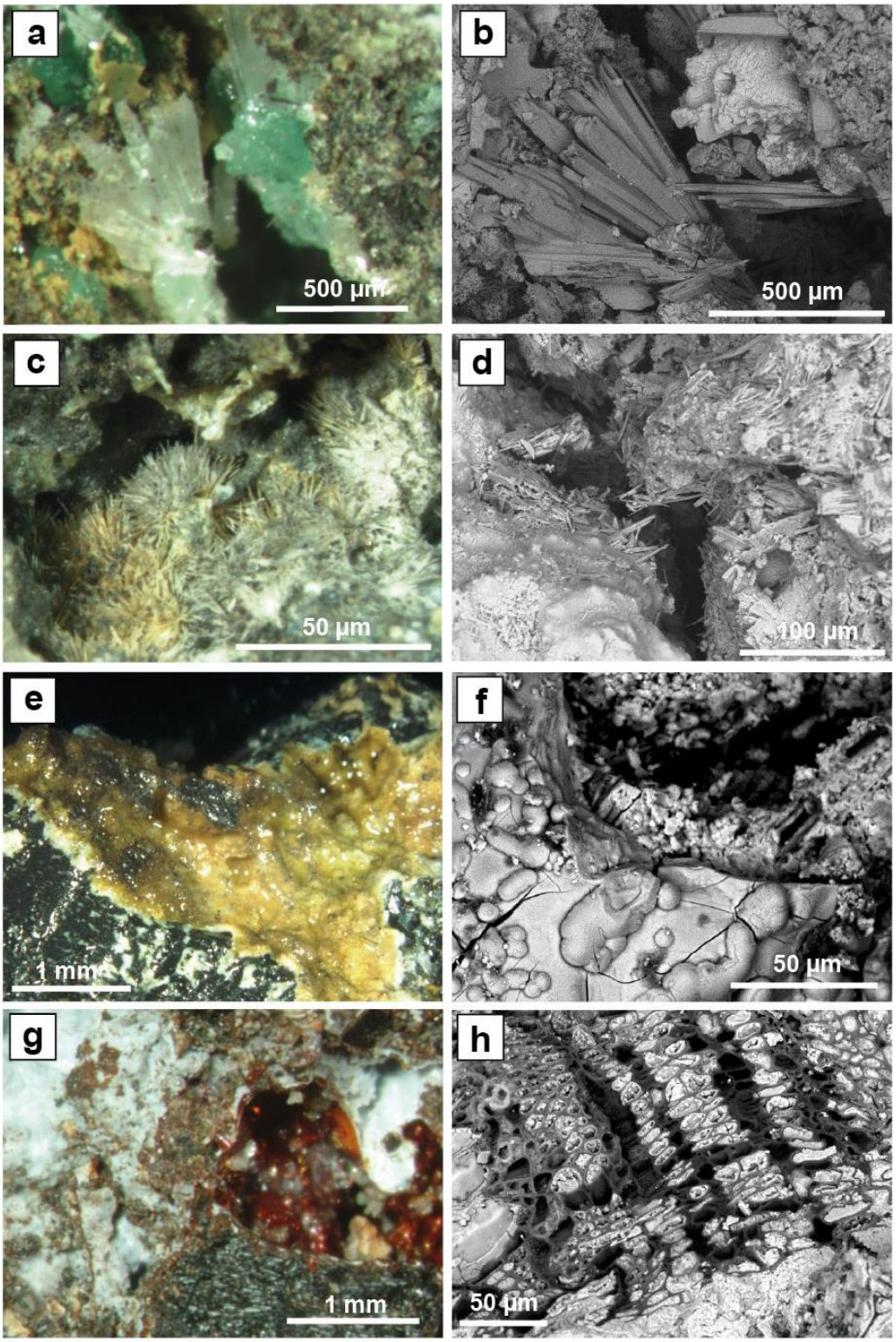


Figure 318 : Observations des grains constituant les résidus de brûlage de la « Place à gaz » à la binoculaire à gauche (a,c,e et g) et au microscope électronique à balayage à droite (b,d,f et h), a), b) cristaux prismatiques blancs et bleu-verts développés dans la porosité, c), d) cristaux blancs aciculaires à croissance radiale, e) Un grain de charbon de bois couvert d'une phase amorphe jaune, f) surface d'une phase amorphe micro craquelée et couverte de nodules, g) une phase blanche et rouge accolée à un grain de charbon de bois dont la porosité a été comblée par une phase amorphe blanche, h) image en haute résolution d'un grain de charbon de bois montrant la structure tubulaire ligneuse[1942].

[1942]Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit*. p. 73.

4. Caractérisation chimique des résidus de brûlage et des pollutions des sols associées. Le *Fingerprint* des opérations de brûlage

4.1. METAUX ET METALLOÏDES (ELEMENTS TRACES METALLIQUES, ETM)

4.1.1 Origines potentielles des ETM présents dans les REG de la Grande Guerre

Les Eléments Trace Métalliques (ETM) introduits dans les sols par les opérations de brûlage peuvent avoir plusieurs origines au regard de la connaissance historique actuelle des pratiques de neutralisation des REG par l'action du feu et des compositions des engins de guerre de la Première Guerre mondiale sur le front occidental.

Les fusées d'artillerie des Alliés étaient majoritairement composées de laiton (Cu_3Zn), un alliage fait de cuivre (Cu) et de zinc (Zn) dans des proportions variables, avec éventuellement, pour les laitons actuels, d'autres métaux associés comme le plomb (Pb), l'étain (Sn), le nickel (Ni), le chrome (Cr) ou le magnésium (Mg). Du fait des pénuries en métaux nobles non ferreux comme le zinc et le cuivre durant la guerre, les industriels allemands privilégièrent pour la confection des fusées d'artillerie des alliages à base d'aluminium (Al), de cuivre, de zinc, parfois en plateaux alternant avec d'autres constitués d'acier (cf. Section 1h du présent manuscrit).

Les amorces des fusées étaient constituées d'une charge de quelques grammes de fulminate de mercure (forme organo-mercurielle de Hg^{2+} - ion mercurique - de formule brute $Hg(CNO)_2$). Sa décomposition thermique libère du mercure inorganique. Le cuivre, le zinc, l'aluminium, le mercure (Hg) mais aussi d'autres ETM présents en impuretés dans les fusées peuvent avoir été introduits dans les sols par les activités de brûlage ou de grillage de fusées d'artillerie.

L'arsenic (As) est un métalloïde clairement présent dans les arsines (chlorure et cyanure de diphénylarsines) des projectiles allemands chimiques lacrymogènes, sternutatoires, émétisant à *Croix bleue* mais aussi dans des agents fumigènes d'autres projectiles chimiques à chargement liquide sous forme de trichlorure d'arsenic $AsCl_3$ (dénommé *Marsite*[1943] dans l'Artillerie française), au même titre que le tétrachlorure d'étain $SnCl_4$ (Liqueur de Libavius ou encore *Opacite* au sein de l'Artillerie française). L'étain (Sn) était aussi utilisé pour étamer et protéger l'intrados de certains obus explosifs chargés en acide picrique (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*). Le plomb (Pb) formait les vases renfermant dans les obus chimiques les composés liquides agressifs pour l'acier, comme certains agents lacrymogènes. Le brûlage d'obus chimiques comme explosifs peut donc être pourvoyeur d'ETM dans les sols.

Il est vraisemblable que la majorité des projectiles détruits par brûlage aient été au préalable déceinturés et il est donc peu probable que le zinc et le cuivre des ceintures aient contribués aux pollutions des sols par les opérations de brûlage. Il n'existe aucune indication historique que des étuis, cartouches de *Small Arms Ammunition* ou de projectiles d'artillerie (en laiton) aient été brûlés en tas, tranchées, pour les neutraliser. Les ergols solides qu'ils renfermaient étaient vidés, puis noyés ou brûlés.

[1943] En lien avec la mine de Marsa en Corse d'où provenait l'arsenic.

4.1.2 Proposition de valeurs hautes de teneurs du Fond Géochimique local

Métaux et métalloïdes sont des composés inorganiques qui entrent dans la constitution des minéraux naturels formant les roches du sous-sol et des sols qui en dérivent. Cette occurrence naturelle est une spécificité des Eléments Traces Métalliques (ETM, anciennement « métaux lourds ») qui les distinguent de la grande majorité des composés organiques étudiés dans le cadre de cette recherche, qui, d'origine synthétique (xénobiotique), n'appartiennent pas au fond géochimique naturel.

L'expression « fond géochimique » désigne la composition chimique moyenne, naturelle et initiale d'un substrat géologique (sol et roche-mère naturel en place), en composés minéraux, élément-traces tels que les ETM. La composition du fond géochimique est directement dépendante de celle des roches mères sur lesquelles se formèrent les sols et des processus biogéochimiques qui s'y déroulent.

Il existe différentes méthodes pour caractériser et exprimer le fond géochimique sur des bases statistiques, par des valeurs moyennes, médianes, les 90e, 95e percentiles d'une distribution des teneurs. D'autres outils géostatistiques peuvent également être utilisés à cet escient comme l'Analyse en Composante Principale (ACP), les analyses de distribution des teneurs et des fréquences cumulées, ou encore des méthodes d'interpolation, de krigeage lorsque le fond géochimique est spatialisé. Enfin, selon les enjeux, la connaissance des distributions spatiales des teneurs multi-élémentaires constituant le fond géochimique peut être affinée par des approches géo-mathématiques comme des simulations stochastiques. Le choix de la meilleure méthode d'évaluation du fond géochimique ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique (des statisticiens et géochimistes).

Quel que soit le lieu de collecte des échantillons, les teneurs en éléments de ces derniers diffèrent peu s'ils appartiennent au fond géochimique naturel. Parfois encore ce fond a été transformé par des apports chroniques diffus d'origine anthropique, sur de longues périodes de temps, sans qu'il soit possible d'en identifier clairement une seule et unique source historique. De tels « fonds géochimiques anthropisés » sont connus et caractérisés dans certaines vallées industrielles du nord de la Lorraine, dans certaines vallées industrielles alpines et pyrénéennes, etc. Ils constituent à présent l'état normal, habituellement rencontré de l'environnement et sert donc d'étalon (faute d'autre référentiel) (i) pour juger de la dégradation par des évènements polluants de l'état des sols, (ii) pour circonscrite les zones d'anomalie géochimique comme les zones de pollution concentrée.

Ces valeurs qualifiant et quantifiant le fond géochimique permettent de discriminer les éléments dont la présence et les gammes de teneurs sont strictement imputables à la géochimie naturelle des sols de ceux qui ont été introduits dans ces sols par les activités anthropiques de brûlage de REG et autres munitions.

On rappelle que l'objectif de cette recherche n'est pas de définir site par site l'état des dégradations environnementales par rapport aux états « normaux » spécifiques aux contextes environnementaux locaux, leurs extensions en surface comme en profondeur, mais bien d'identifier les caractéristiques géochimiques communes aux sites de brûlage (*Fingerprint* générique) et celles qui seraient spécifiques à tout ou parties d'entre eux (*Fingerprint* spécifique). A ce titre ce fond géochimique, usuellement exploité pour qualifier et circonscrire des zones anomaliques dans les diagnostics et les évaluations des risques, est apporté ici à titre indicatif, les teneurs exploitées dans le cadre de cette recherche s'inscrivant dans des gammes extrêmes qui s'écartent indéniablement des valeurs naturelles.

Les fonds géochimiques naturels en environnement agricole ont pu être proposés pour les sites du complexe de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et Rampont (Muzeray), compte tenu (i) du nombre de résultats analytiques acquis, permettant un traitement statistique de la population de données, (ii) de la stratégie d'échantillonnage retenue, visant non seulement à caractériser les résidus de brûlage au plus près des zones de pollution concentrée mais aussi d'en définir les limites géographiques et pour cela de caractériser les sols « propres » « naturels » environnants hors influence des opérations de brûlage.

A Rampont, le Fond Géochimique établit sur la base des mesures de terrain par fluorescence X a pu être comparé pour Zn à celui acquis par l'échantillonnage composite et les analyses différées au laboratoire.

Les sites de Rampont et de Noire Fontaine sont distants d'à peine un kilomètre et sont implantés sur des formations géologiques identiques, à savoir les argiles et limons terreux à éléments et plaquettes calcaires issus de l'altération des marno-calcaires du Bathonien (étage stratigraphique du Jurassique moyen (Dogger)) de la formation de la Dalle d'Etain. Les fonds géochimiques sont donc a priori proches ou similaires pour ces deux sites. Une analyse de la distribution des teneurs et des fréquences cumulées fut effectuée. Les valeurs hautes du fond géochimique correspondent à une rupture de pente de la distribution des teneurs par rapport au pourcentage de la population de mesures inférieures à cette valeur aux plus basses teneurs, lorsque celles-ci présentent une faible variabilité. Des teneurs de valeur hautes de fond géochimique ont été proposées pour les sites de Rampont et de Noire Fontaine dans le rapport « *Hubé, D. Bâlon, P. Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». Ces valeurs ont été exploitées dans ce qui précède pour qualifier les teneurs en métaux et métalloïdes mesurés dans les sols de surface du terrain d'explosion de Vaudoncourt Loison (cf. Tableau 45). Ces teneurs ont été détaillées dans le Tableau 48 et le Tableau 49, pour respectivement les sites de Rampont et de Noire Fontaine.

Elément	Nombre de quantification / nombre de mesures	Valeur haute du fond géochimique (mg.kg^{-1} MS)	Gamme de teneurs d'anomalie modérée (mg.kg^{-1} MS)	Gamme de teneurs d'anomalie élevée (mg.kg^{-1} MS)	Teneur maximale mesurée (mg.kg^{-1} MS)
Cuivre (Cu) mesures au laboratoire	87/87	**40**	[40 - 65]	[65 – 1 300]	1 300
Zinc (Zn) mesures aulaboratoire	87/87	**350**	[350 -800]	[800 – 34 000]	34 000
Zinc (Zn) mesures sur le terrain FX	155/155	**400**	[400-2 400]	[2 400-24 000]	24 000
Arsenic (As) mesures au laboratoire	113/113	**58**	[58-220]	[220-1 100]	1 100
Cadmium (Cd) mesures au laboratoire	43/113	**3**	[3-6]	[6-34]	34
Étain (Sn) mesures au laboratoire	106/113	**5**	[5-38]	[38-2 200]	2 200
Mercure (Hg) mesures au laboratoire	55/113	**0,3**	[0,3-1,5]	[1,5-4,7]	4,7
Plomb (Pb) mesures au laboratoire	113/113	**45**	[45-88]	[88-1 900]	1 900

Tableau 48 : Teneurs proposées pour les valeurs hautes du fond géochimique local et gammes de teneurs anomaliques pour les sols de surface du site de la Ferme de Rampont à Muzeray (Janvier 2015-août 2016).

Elément (dosage au laboratoire)	Nombre de quantifications / d'échantillons analysés	Valeur haute du fond géochimique local (mg.kg^{-1} MS)	Gamme d'anomalie modérée (mg.kg^{-1} MS)	Gamme d'anomalie élevée (mg.kg^{-1} MS)	Valeur maximale mesurée (mg.kg^{-1} MS)
Cuivre (Cu)	40/41	**65**	[65 - 200]	[200 - 520]	520
Zinc (Zn)	87/88	**250**	[250 - 750]	[750 - 3 800]	3 800
Arsenic (As)	87/88	**20**	[20 - 200]	[200 – 1 000]	1 000
Cadmium (Cd)	22/88	[0,3 - 4,5]			
Etain (Sn)	82/87	**50**	[50 - 500]	[500 - 2 700]	2 700
Mercure (Hg)	73/82	**0,9**	[0,9 - 3,4]	[3,4 - 23]	23
Plomb (Pb)	87/88	**35**	[35 - 150]	[150 - 1 400]	1 400

Tableau 49 : Valeurs hautes du fond géochimique en éléments tracées métalliques et gammes de valeurs anomaliques pour le site de Noire Fontaine à Vaudoncourt (Janvier 2015-août 2016).

Les teneurs hautes du fond géochimique apparaissent relativement élevées pour l'arsenic à Rampont (avec 58 mgAs.kg^{-1} MS) comparativement à Noire Fontaine qui s'inscrit plus dans le fond pédo-géochimique lorrain renseigné dans la littérature (20 mgAs.kg^{-1}MS)[1944]. Par ailleurs, un écart significatif est constaté pour l'étain entre Rampont (5 mgSn.kg^{-1}MS) et Noire Fontaine (50 mgSn.kg^{-1}MS). Ces écarts sont liés aux différences du nombre d'échantillons (plus élevé à Noire Fontaine qu'à Rampont) et de stratégie d'échantillonnage (renforcement de l'échantillonnage périphérique aux zones de pollution concentrée à Noire Fontaine pour en préciser les contours et restreindre au maximum les terres agricoles à maintenir sous séquestre) entre les deux sites. Plus l'échantillonnage s'approche des zones de pollution concentrée, plus il est sous influence anthropique et moins il peut être considéré comme représentatif du Fond Géochimique. Ainsi, il est proposé ici de retenir pour les sites de Noire Fontaine et Rampont, les valeurs minimales pour qualifier le fond géochimique (cf. Tableau 50).

Elément	Valeur haute du fond géochimique local (mg.kg^{-1} MS)
Cuivre (Cu)	**40**
Zinc (Zn)	**250**
Arsenic (As)	**20**
Cadmium (Cd)	**3**
Etain (Sn)	**5**
Mercure (Hg)	**0,3**
Plomb (Pb)	**35**

Tableau 50 : Valeurs hautes du fond géochimique en éléments traces métalliques retenues pour les sites de Noire Fontaine et de Rampont.

4.1.3 ETM anomaliques

Les résultats analytiques sur ces échantillons sont rassemblés dans les tableaux placés en Annexe G du présent manuscrit.

Ces éléments sont majoritairement, le zinc (Zn), l'arsenic (As), et le plomb (Pb), pour lesquels les teneurs peuvent s'avérer extrêmes : [Zn] > 100 000 mgZn.kg^{-1} MS à Trélon (terrain de brûlage n°2 du Parc Jeannette) et [As] > 100 000 mgAs.kg^{-1} MS, [Pb] > 100 000 mgPb.kg^{-1} MS à la « Place à gaz ».

[1944] Clozel-Leloup, B., Fourniguet, F., Camizuli, E., Ponchant, P., Crouzet, C., Baudron, J.C. (2009). *Présence naturelle dans les sols lorrains : cartographie en vue de la détermination des zones d'exposition de la population. Rapport final*. BRGM/RP-54635-FR. Décembre 2009.

Les teneurs en cuivre (Cu) peuvent s'élever jusqu'à plus de 19 000 mgCu.kg^{-1} MS, comme à Trélon (terrain de brûlage n°2 du Parc Jeannette), soit un facteur cinq inférieur par rapport aux teneurs en zinc. Les teneurs en cuivre sont toujours inférieures à celles en zinc.

Quant à l'étain (Sn) ses teneurs élevées sont généralement inférieures à 1 000 mgSn.kg^{-1} MS avec un pic à 69 000 mgSn.kg^{-1} MS dans la partie nord-est du site de l'ancienne usine de Rampont. Les teneurs en cadmium peuvent atteindre des valeurs supérieures à 100 mg.kg^{-1} MS comme sur la « Place à gaz » et au Parc Jeannette. Le mercure total (Hg) apparaît en teneurs anomaliques par rapport au fond géochimique. Elles peuvent s'élever jusqu'à 65 mgHg.kg^{-1} MS comme dans les résidus de brûlage du Bois l'Abbé.

D'autres ETM ont été recherchés dans les résidus de brûlage lors des phases exploratoires visant les premiers sites investigués à savoir ceux de la « Place à gaz » (et ses trois entités « tache centrale », « fosse » et « dépôt nord ») puis les BG de la *C-Factory* à Trélon et Liessies. Il s'agit en particulier du chrome (Cr), du nickel (Ni) et l'antimoine (Sb) dosé dans seulement 7% des 509 échantillons visés par l'analyse d'ETM à des teneurs supérieures à la limite de quantification appliquée par les laboratoires que dans 3,5% des échantillons. Les teneurs en Sb mesurées sont inférieures à 100 mgSb.kg^{-1} MS, que ce soit à la « Place à gaz » ou à Trélon mais possiblement anomaliques dans des horizons interface comme la couche limite calcaire entre les résidus de brûlage de la tache centrale de la « Place à gaz » et les terrains naturels. Ces teneurs en Sb avoisinent les 300-400 mgSb .kg^{-1} MS.

Concernant le chrome total, il a été recherché dans 16,7% des échantillons. Les teneurs sont alors systématiquement dosées au-dessus des limites de quantification appliquées par les laboratoires. Au-delà de 50 mgCr.kg^{-1} MS les teneurs apparaissent anomaliques, puis extrêmes au-delà de 200 mgCr.kg^{-1}(cf. Figure 319). Pour le nickel, seulement 2,7% des échantillons ont été analysés pour ce paramètre. Les teneurs sont majoritairement restreintes entre 20 et 70 mgNi.kg^{-1} MS (cf. Figure 320).

Cr, Ni, Sb, n'apparaisent pas comme des marqueurs significatifs de la chimie des résidus de brûlage au regard d'autres éléments et en particulier As, Zn, Cd, Pb et Sn sur lesquels se focalise l'analyse statistique descriptive exposée dans ce qui suit.

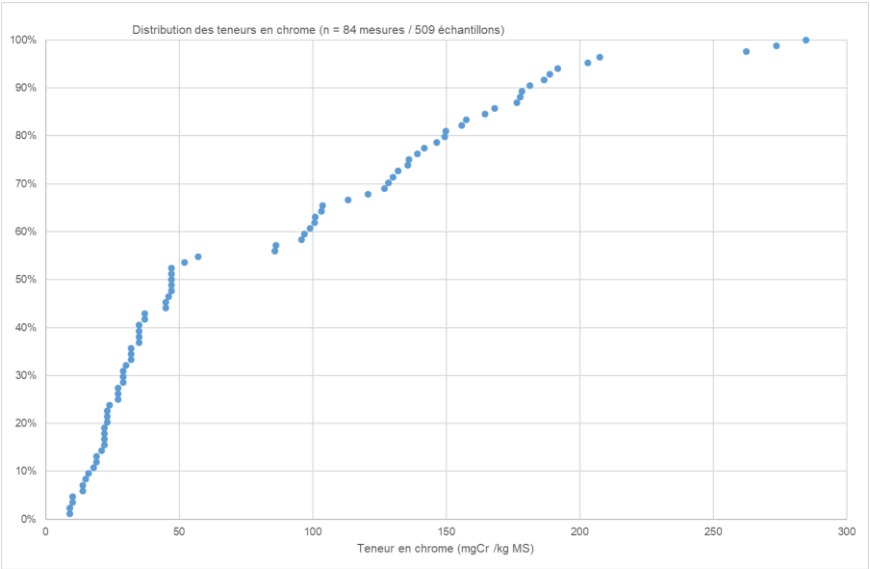


Figure 319 : Distributions des teneurs en chrome (Cr) des échantillons analysés.

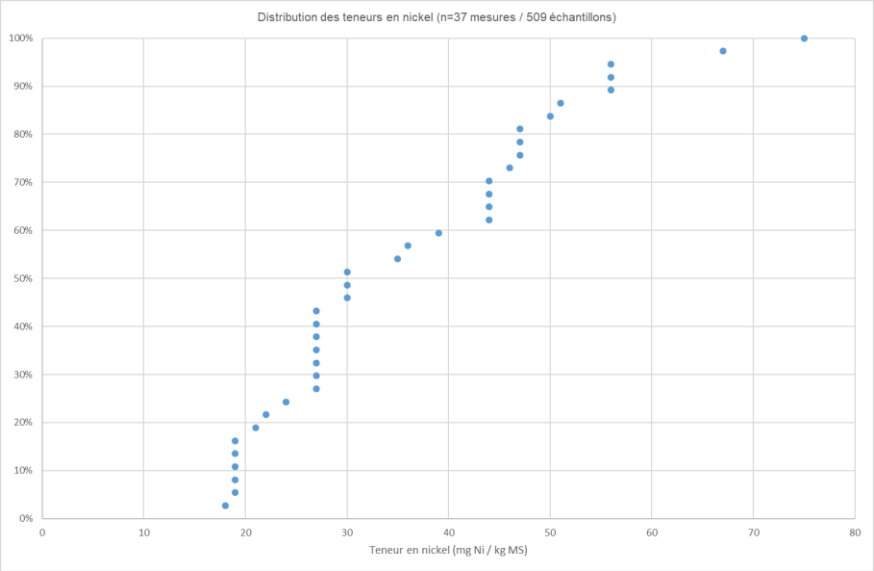


Figure 320 : Distributions des teneurs en nickel (Ni) des échantillons analysés.

4.1.4 Statistique descriptive et statistique exploratoire

Objectifs

Les analyses des sols prélevés sur les terrains de brûlage montrent l'occurrence de très fortes teneurs en ETM, notamment Zn, Cd, Cu, Pb, As, Sn et Hg, avec des disparités spatiales (selon les sites et au sein de chaque site), et ne s'inscrivant en rien dans les gammes de teneurs caractérisant les fonds géochimiques locaux, comme ceux caractérisés dans ce qui précède. Parmi les fonds géochimiques les plus arséniés connus en France à des échelles régionales figurent ceux de zones d'affleurement de la minette oolitique de l'Aalénien dans le bassin ferrifère lorrain, avec une valeurs moyennes des teneurs avoisinant 20 $mgAs.kg^{-1}$ MS[1945] (et exploitée à proximité de Spincourt). Les sols établis sur les formations crayeuses ne sont pas réputés arséniés.

Le Ni, Cr et Sb furent également recherchés dans les premiers échantillons exploratoires collectés dans les résidus de brûlage des zones de pollution les plus concentrées afin d'identifier, sur la base d'une liste de paramètres analytiques élargie, les cortèges métalliques anormaux en présence. Ces trois ETM ne s'avèrent pas être présents dans ces résidus de brûlage à des teneurs anormales significatives comparativement aux ETM listés ci-avant. Ni, Cr, Sb n'ont pas ensuite été recherchés systématiquement.

Dans le contexte spécifique de la présente recherche et à la faveur des investigations menées par le BRGM sous mandat du Ministère en charge de l'environnement (site de la « Place à gaz », Clere & Schwander de Noire Fontaine et Rampont), 425 échantillons de sols et de résidus de brûlage furent analysés pour déterminer les teneurs en ETM. Cela a généré près de 1 800 résultats analytiques au laboratoire. 200 autres résultats proviennent d'études et recherches tierces et gracieusement mises à disposition afin d'alimenter la présente recherche (Westroozebeke, Audruicq, Zweedorf).

[1945] Ibid Clozel-Leloup, B., Fourniguet, F., Camizuli, E., Ponchant, P., Crouzet, C., Baudron, J.C. (2009). *Présence naturelle dans les sols lorrains : cartographie en vue de la détermination des zones d'exposition de la population*, op. cit.

Les objectifs du travail dans le présent chapitre sont, à partir de cette base de données (teneurs en ETM), (i) d'identifier les cortèges d'ETM caractérisant les résidus de brûlage, (ii) rechercher les corrélations entre les variables (ETM) et les similitudes/différences de sites (recherche de signatures génériques/spécifiques) puis, (iii) les interpréter au travers du prisme des faits et pratiques historiques de destruction de munitions par OB. Dans cette optique une Analyse en Composante Principale (ACP) est proposée.

L'ACP est une technique exploratoire pour rationaliser le nombre de variables dans une analyse statistique pour pouvoir proposer un decryptage causal spatial approfondi. Cette méthode est particulièrement adaptée au traitement statistique de jeux de données importants. Auparavant, les données sont présentées pour chaque ETM sous forme de *box-plot* (boîtes à moustaches) pour chaque site d'étude, comme décrit ci-dessous. Enfin, des corrélations des ETM deux à deux ont été réalisées et complètent les autres présentations des données.

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé avec le logiciel R-Studio version 2023.6.1.524 (REF) avec les packages *factoextra* et *ggplot2*.

Ensembles de données et nombre de variables

Les analyses statistiques descriptives ont été réalisées sur deux ensembles de données.

Le premier rassemble les résultats analytiques en As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn et Sn, pour lesquels des teneurs supérieures aux limites de quantification appliquées par les laboratoires ont été mesurées. Cela concerne 47 points d'échantillonnage (individus) provenant de cinq sites, sept ETM (variables), formant un ensemble de 329 valeurs. Les cinq sites considérés sont : les terrains de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et Rampont (Muzeray) dans le département de la Meuse, les *Burning Grounds* de l'ancienne usine F.N. Pickett & Fils de Trélon et Liessies dans le département du Nord, et le site de brûlage identifié à Conteville où F.N. Pickett & Fils exploita une usine de destruction de munitions.

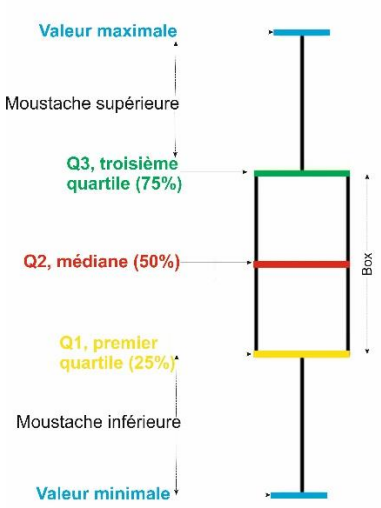
Le second ensemble de données rassemble les résultats analytiques des teneurs en As, Cd, Pb et Zn, quantifiées au-dessus des limites de quantification (LQ) pour intégrer une plus large variété de sites. Cela concerne 82 points d'échantillonnage (individus) provenant des cinq sites précédemment cités (i.e., les terrains de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et Rampont (Muzeray), les *Burning Grounds* de l'ancienne usine F.N. Pickett & Fils de Trélon et Liessies, et le site de brûlage identifié à Conteville où F.N. Pickett & Fils exploita une usine de destruction de munitions), auxquels s'ajoutent trois sites pour lesquels les teneurs en Cu, Hg et Sn n'ont pas été mesurées : le site de la « Place à gaz » subdivisé en (i) « Tache centrale » qui est la clairière recouverte de résidus, (ii) « Fosse » qui est la fosse de brûlage identifiée à quelques mètres des limites au nord-est de la clairière, puis (iii) « dépôt nord », des résidus de brûlage découverts et identifiés en 2014 par hasard à quelques dizaines de mètres au nord de la « tache centrale ». Ces trois zones de brûlage, faisant partie du site de la « Place à gaz », ont été discriminées pour en dégager toutes leurs spécificités. Les 85 points d'échantillonnage incluent les 47 points du premier ensemble de données ainsi que d'autres points où nous disposions des données pour les quatre ETM majeurs (As, Cd, Pb et Zn).

Les données issues des deux ensembles, utilisées dans cette première exploration statistique, sont présentées en Annexe E.

Distribution des valeurs des variables

Les données ont été, dans un premier temps, représentées au moyen de boîtes à moustaches (*Whisker Box*), permettant de visualiser la distribution des valeurs des variables (teneurs pour chacun des ETM).

Principe des boîtes à moustache (Box-plot)



La ligne centrale dans la boîte est celle de la médiane. Si les données sont symétriques, la médiane se situe au centre de la boîte. Si les données sont dissymétriques, la médiane sera plus proche du haut ou du bas de la boîte. Le limites supérieures et inférieures correspondent aux 25e et 75e quantiles ou centiles. La longueur de la boîte est l'intervalle interquartile (IQR). Les moustaches étendent 1,5 fois l'IQR du haut et du bas de la boîte ou à l'intervalle entre valeurs minimales et maximales. Si des valeurs tombent au-dessus ou au-dessous de l'extrémité des moustaches, elles sont représentées sous forme de points. Ces points sont des valeurs aberrantes. Une valeur aberrante est plus extrême que la valeur attendue.

Les distributions des teneurs en As, Zn, Cd et Pb sont présentées sous forme de boîtes à moustaches sur la Figure 322, celles en Hg, Cu et Sn sur la Figure 323. Certaines teneurs s'avèrent extrêmes et très significativement anomaliques (comparativement aux teneurs habituellement rencontrées dans les fond géochimiques, naturels comme anthropisés). Des teneurs supérieures à la dizaine de grammes par kilogramme de matrice solide (> 1%) ont été relevées pour As, Zn, Pb et ponctuellement Sn.

Les teneurs en As les plus élevées sont mesurées sur le site de la « Place à gaz », notamment dans la partie centrale du terrain de brûlage avec des valeurs supérieures à 110 gAs.kg^{-1} MS (matière sèche). Ces valeurs sont de plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles mesurées pour les autres sites. Un zoom sur les teneurs des autres sites que celui hyperarsénié de la « Place à gaz » est présenté afin d'apprécier la distribution de teneurs en arsenic. Les résidus allochtones de combustion d'arsine du Bois l'Abbé titrent encore ponctuellement à plus de 2,6 gAs.kg^{-1} MS et respectivement 11 gAs.kg^{-1} MS et 9,8 gAs.kg^{-1} MS pour la fosse de brûlage satellite à la tache centrale de la « Place à gaz » et les résidus découverts au nord du terrain de brûlage principal (cf. Figure 321). Ces valeurs très élevées restent toutefois d'un ordre de grandeur au moins (facteur 10) inférieures à celles relevées au droit du terrain de brûlage principal de la « Place à gaz ». Le nombre trop peu élevé d'échantillons sur les résidus au Bois l'Abbé (n = 3) et au dépôt nord (n = 3) portant ces valeurs très élevées peut possiblement introduire ici un biais par un effet pépite.

Concernant les aires de brûlage du Parc Jeannette à Trélon, de Noire Fontaine et de Muzeray dans le canton de Spincourt et au Bois Brûlé à Conteville, les teneurs en As sont toujours anomaliques d'un facteur d'environ 5 à 10 par rapport aux fonds géochimiques arséniés de la zone d'affleurement de la minette de l'Aalénien dans le bassin ferrifère lorrain.

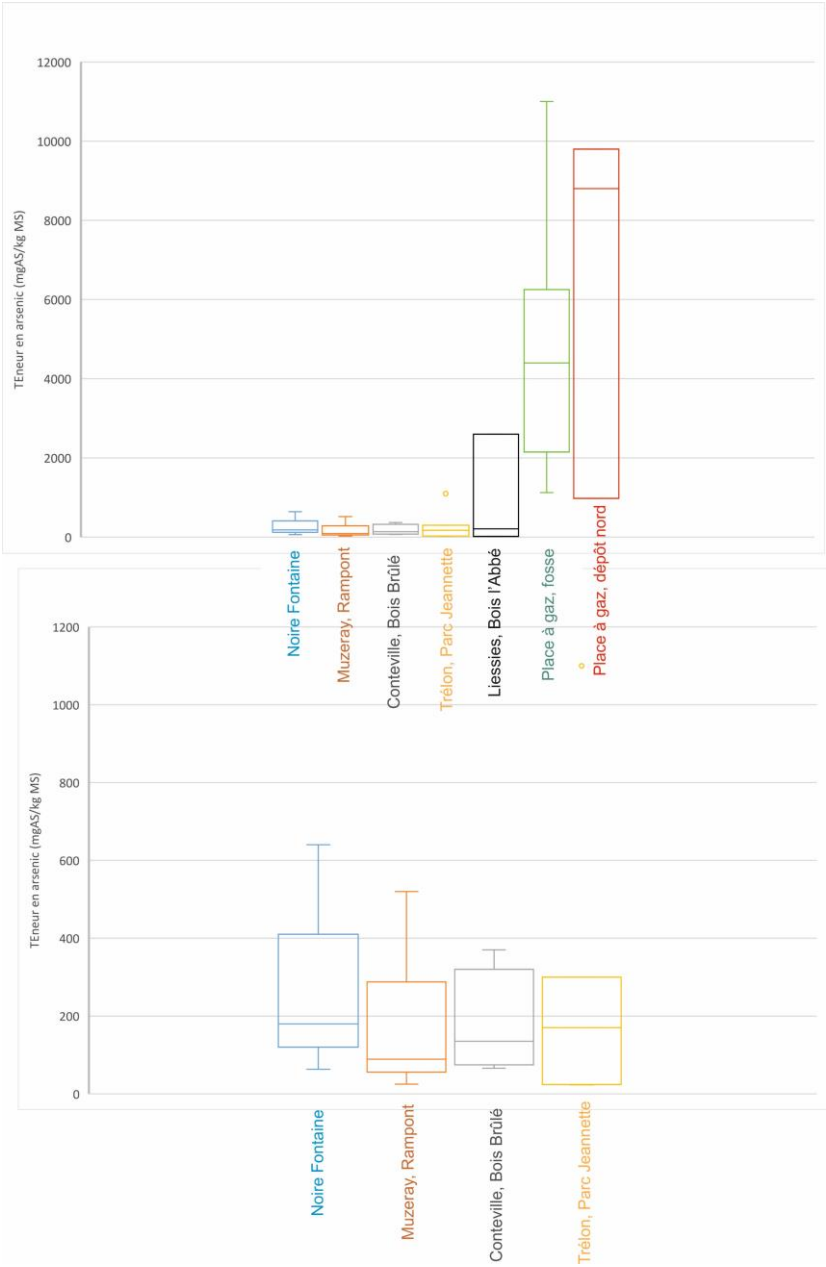


Figure 321 : Distributions des teneurs en arsenic dans les sols et les résidus de brûlage (en haut). Idem mais sans les terrains de brûlage de la « Place à gaz » (en bas).

Pour le Zn, des teneurs élevées sont mesurées dans les sols des terrains de brûlage du Parc Jeannette à Trélon (*C-Factory* F.N. Pickett & Fils, secteur sud) (valeur moyenne de 76 gZn.kg^{-1} MS, avec une valeur maximale qui atteint 300 gZn.kg^{-1} MS), et du Bois l'Abbé à Liessies (*C-Factory* F.N. Pickett & Fils, secteur nord ; moy = 76 gZn.kg^{-1} MS, max = 130 gZn.kg^{-1} MS), et dans les sols au dépôt nord (moy = 92 g.kg^{-1} MS, max = 130 gZn.kg^{-1} MS) et au sein de la tache centrale de la « Place à gaz » (moy = 30 gZn.kg^{-1} MS, max = 38,7 gZn.kg^{-1} MS) avec une distribution des teneurs nettement asymétrique (distribution spatiale hétérogène).

Des distributions similaires sont mises en évidence pour le Cd avec des teneurs maximales mesurées dans les sols à Trélon (> 250 mgCd.kg^{-1} MS), avec des distributions symétriques, ainsi qu'à Liessies (moy = 91,5 mgCd.kg^{-1} MS, max = 160 mgCd.kg^{-1} MS), et au dépôt nord (moy = 117 mgCd.kg^{-1} MS, max = 170 mgCd.kg^{-1} MS) et au sein de la tache centrale de la « Place à gaz » (moy = 15 mgCd.kg^{-1} MS, max = 80 mgCd.kg^{-1} MS).

Pour le Pb, de fortes teneurs sont également mesurées dans les sols de la « Place à gaz ». Cependant, contrairement aux autres ETM, les plus fortes valeurs en Pb ne sont pas observées uniquement dans le dépôt nord (moy = 4,25 gPb.kg^{-1} MS, max = 6,5 gPb.kg^{-1} MS) et au sein de la tache centrale de la « Place à gaz » (moy = 4,3gPb.kg^{-1} MS, max = 16 gPb.kg^{-1} MS) mais davantage dans les résidus de la fosse de brûlage (moy = 4,7 gPb.kg^{-1} MS, max = 143 gPb.kg^{-1} MS), avec une distribution asymétrique. Les teneurs en Pb pour les autres sites de brûlage sont nettement plus faibles que celles mesurées sur le site de la « Place à gaz », elles sont néanmoins très nettement supérieures au fond géochimique.

Sn, Cu et Hg apparaissent aussi à des teneurs significativement anomaliques comparativement aux gammes de teneurs couramment rencontrées dans les fonds géochimiques.

Sn est un métal rarement mesuré sur les sites et sols pollués à des teneurs anomaliques. Ce métal a été systématiquement quantifié à des teneurs élevées sur les sites de destruction de munitions chimiques, en particulier à Noire Fontaine (moy = 54 mgSn.kg^{-1} MS, max = 400 mgSn.kg^{-1} MS). A noter que la valeur extrême de 69 gSn.kg^{-1} MS mesurée au droit de l'ancienne usine Clere & Schwander de Rampont n'a pas été représentée dans la *box-plot* de l'étain pour rendre les valeurs autres lisibles. Des teneurs localement très élevées ont aussi été dosées ponctuellement dans des résidus de brûlage allochtone d'obus à *Croix bleue* au Bois l'Abbé à Liessies (avec 900 mgSn.kg^{-1} MS), dans les résidus du plus grand des terrains de brûlage du Parc Jeannette à Trélon (avec 240 mgSn.kg^{-1} MS), ou encore au Bois Brûlé à Conteville (avec 240 mgSn.kg^{-1} MS).

Le Cu présente des valeurs extrêmes sur les terrains de brûlage du Parc Jeannette à Trélon (moy = 6,2 gCu.kg^{-1} MS, max = 23 gCu.kg^{-1} MS) ainsi que, ponctuellement, dans les résidus allochtones du Bois l'Abbé (max = 28 gCu.kg^{-1} MS).

Les plus fortes teneurs en Hg total ont été mesurées dans les dépôts autochtone de l'aire de brûlage du Bois l'Abbé à Liessies avec 65 mgHg.kg^{-1} MS.

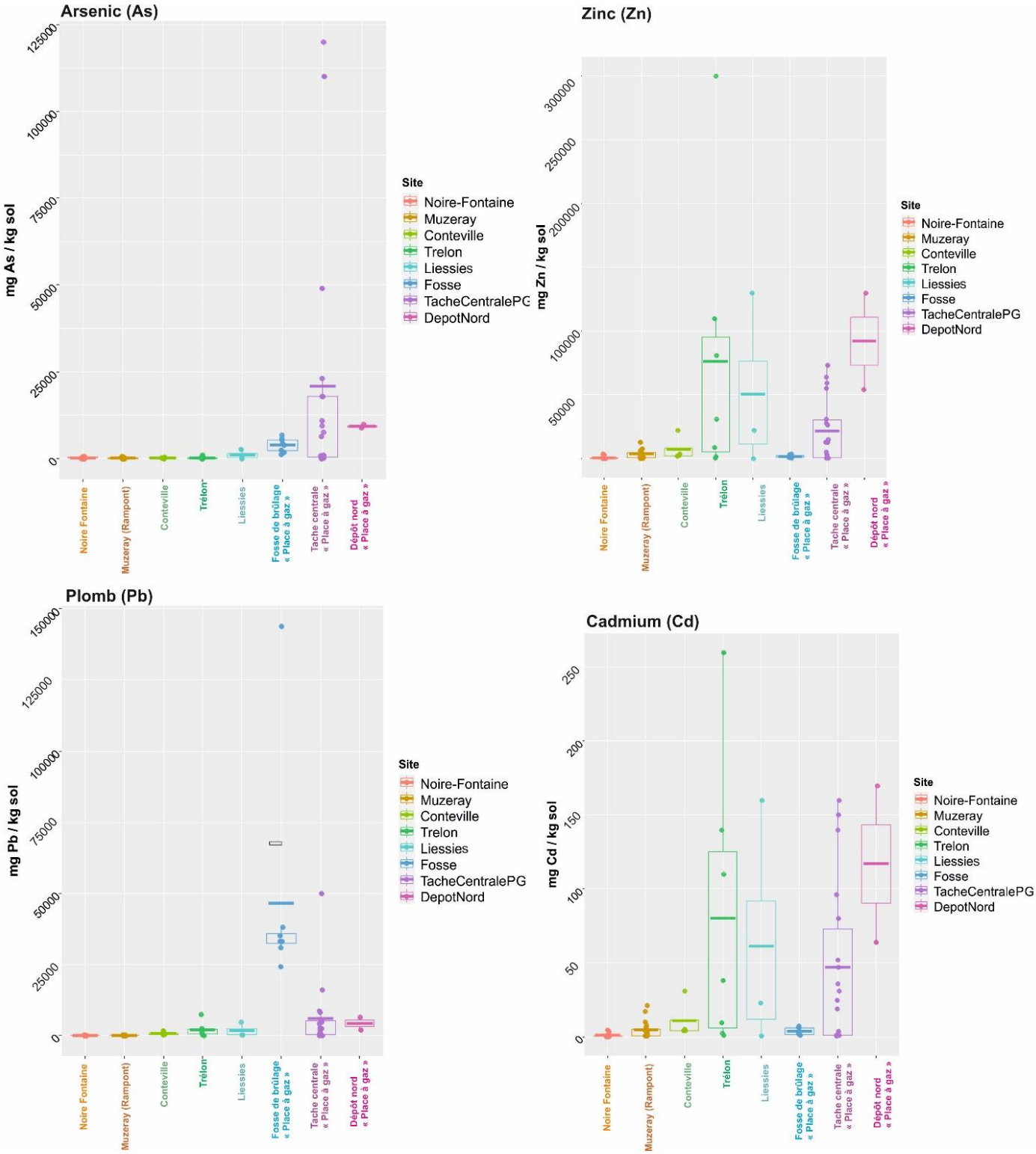


Figure 322 : Distribution des teneurs en ETM (box plots) pour le second ensemble de données à quatre variables (As, Cd, Pb, Zn).

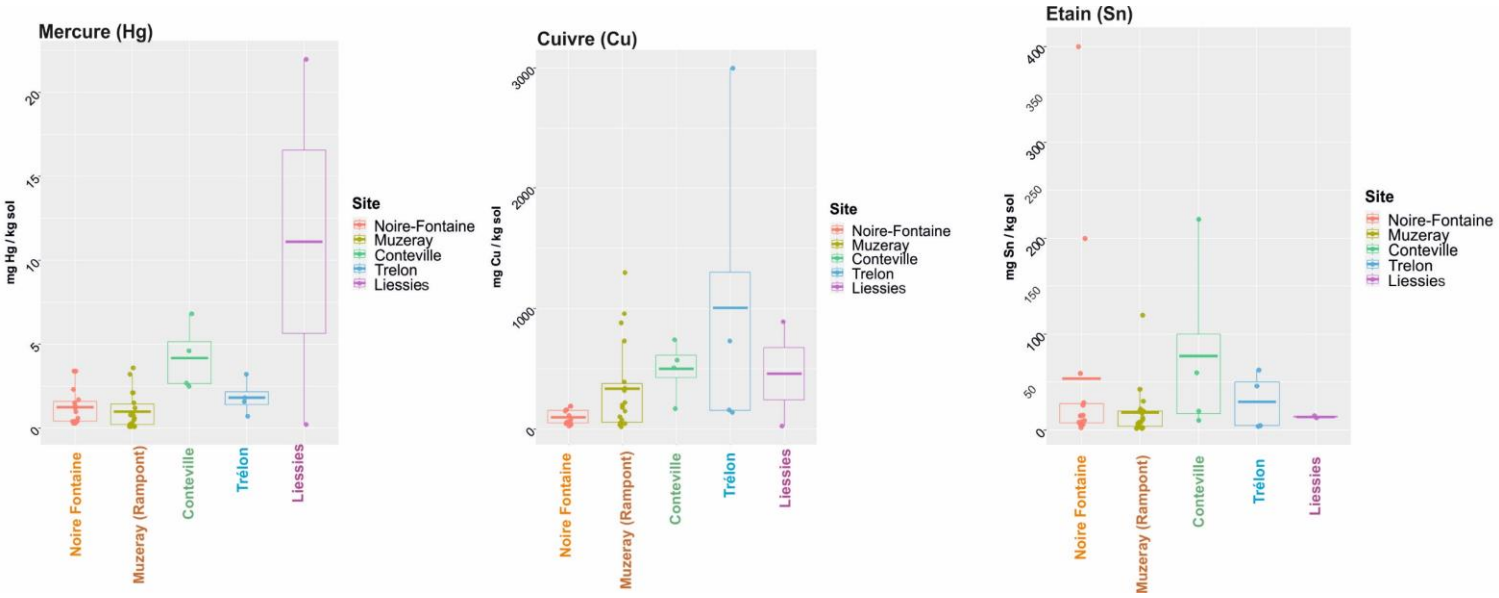


Figure 323 : Distribution des teneurs (box-plots) pour le premier ensemble de données à sept variables (Cu, Hg, Sn).

Analyses en Composantes Principales (ACP)

- **Principes et objectifs**

Le principe et les objectifs de l'Analyse en Composante Principale (ACP) sont détaillés et exposés en Annexe F du présent manuscrit.

- **Résultats**

L'ACP centrée et normée représentée sur la Figure 324 (*biplot* de corrélation) décrit 54,6 % de la variabilité des données sur la composante principale 1 et 25,6% sur la composante principale 2. La projection des sites dans le nouveau repère met en évidence trois groupes de sites distincts ; (i) sites dominés par les teneurs en Zn et Cd, (ii) sites dominés par l'As, et (iii) sites dominés par le Pb. Des ellipsoïdes ont été tracés afin de faciliter de façon schématique et indicative l'identification des différents groupes de points.

L'orthogonalité des vecteurs des variables Pb et ceux, très proches, des variables Zn et Cd, montre que les teneurs en Pb sont indépendantes (absence de corrélation) de celles en Zn et en Cd qui sont très bien corrélées entre elles. La longueur du vecteur du Pb confirme ce qui a été mis en évidence par l'analyse descriptive par « boîtes à moustaches » (cf. Figure 322 et Figure 323) à savoir une grande dispersion des teneurs avec des valeurs extrêmes (écart-type élevé de la distribution des valeurs). Le vecteur du Pb est quasiment superposé à l'axe 2 ce qui signifie que cet élément est très bien représenté sur cet axe et très bien corrélé avec cet axe; il en est de même pour Cd et Zn avec l'axe 1, tandis qu'As est éloigné des deux axes factoriels et plus proche de l'axe 1 où Cd et Zn sont bien représentés.

Les échantillons issus des sites Clere & Schwander de Noire Fontaine et Rampont, ainsi que ceux de Conteville sont très proches de l'origine (intersection des deux axes). Ces points situés près du centre sont généralement mal représentés par le plan factoriel.

Leur interprétation ne peut donc pas être effectuée avec confiance. Les points SPIN01 (prélevé dans la fosse de la « Place à gaz »), TC5 (tache centrale, « Place à gaz ») et TPJ2TC (le plus grand des deux *Burning Grounds* du Parc Jeannette, Trélon) sont dissemblables et possèdent des caractéristiques particulières car sortent des groupes.

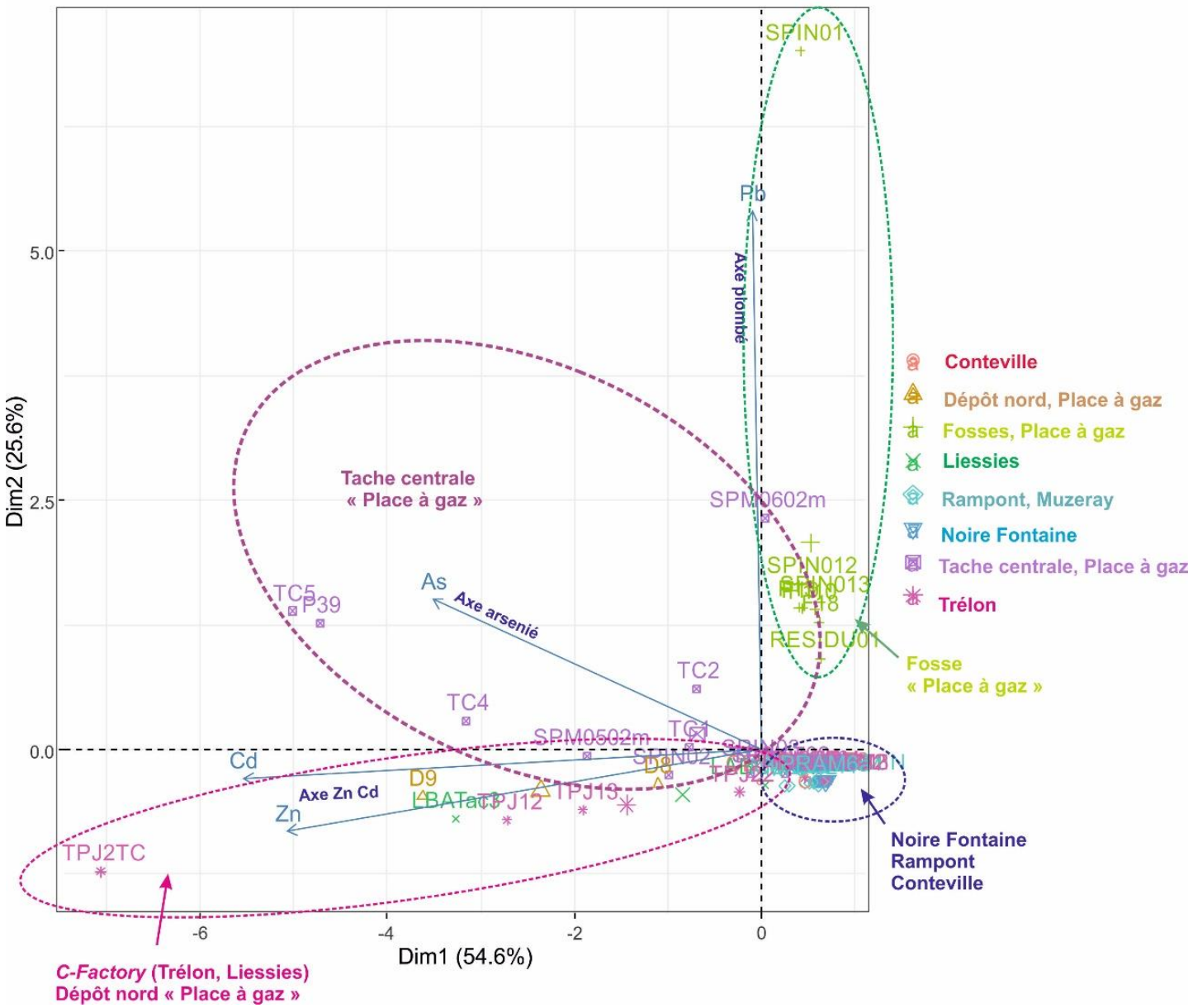


Figure 324 : Analyse en Composante Principale (ACP) centrée et normée sur l'ensemble 2 de données à 4 variables (As, Zn, Pb, Cd). Biplot de corrélation.

Ne figure plus dans le second ensemble de données le site de la « Place à gaz », ce qui permet de visualiser les distributions des sites qui avaient été masquées par celle de la « Place à gaz » sur les représentations de la Figure 325. On retrouve des distributions en Zn et en Cd proches avec les valeurs les plus élevées sur les trois terrains de brûlage à Trélon et Liessies et pour le Bois Brûlé à Conteville. Ces distributions apparaissent dissymétriques pour les sites de Conteville et Rampont (Muzeray). Les teneurs en Cu les plus élevées ont été relevées pour le site de Trélon avec près de 3 $g.kg^{-1}$ MS, suivies de celles du site de Rampont, montrant une distribution asymétrique avec des valeurs extrêmes.

Ce type de distribution est aussi constaté pour ce site pour le Pb, le Sn et le Cd. Quant au Hg, les valeurs les plus élevées ont été mesurées à Liessies (avec près de 25 mg.kg^{-1} MS), puis à Conteville (7 mg Hg.kg^{-1} MS) avec des distributions symétriques pour chacun des cinq sites. Enfin, Sn est présent avec des valeurs extrêmes pour les sites Clere & Schwander de Noire Fontaine (jusqu'à 400 mg.kg^{-1} MS) et surtout Rampont (avec 69 g.kg^{-1} MS, hors champ de la représentation).

Des tendances se dégagent de l'ACP (*biplot* de corrélation). Premièrement, on constate une grande proximité et une interdépendance du Zn, du Cu, du Cd et du Hg. Ensuite le vecteur de Sn est orthogonal avec ceux de Cd, Zn, Cu et Hg, signifiant que Sn est indépendant (absence de corrélation) avec ces quatre éléments. Cd, Zn et en moindre mesure Cu et Hg sont proches du premier axe factoriel où ces éléments sont donc bien représentés. Le vecteur des variables de Sn est quant à lui proche du second axe factoriel où il est bien représenté (pour le site de Noire Fontaine). Le vecteur du Pb est à 45° des deux axes factoriels, montrant une certaine relation avec les variables représentées sur les deux axes (Cd, Zn d'une part et Pb d'autre part).

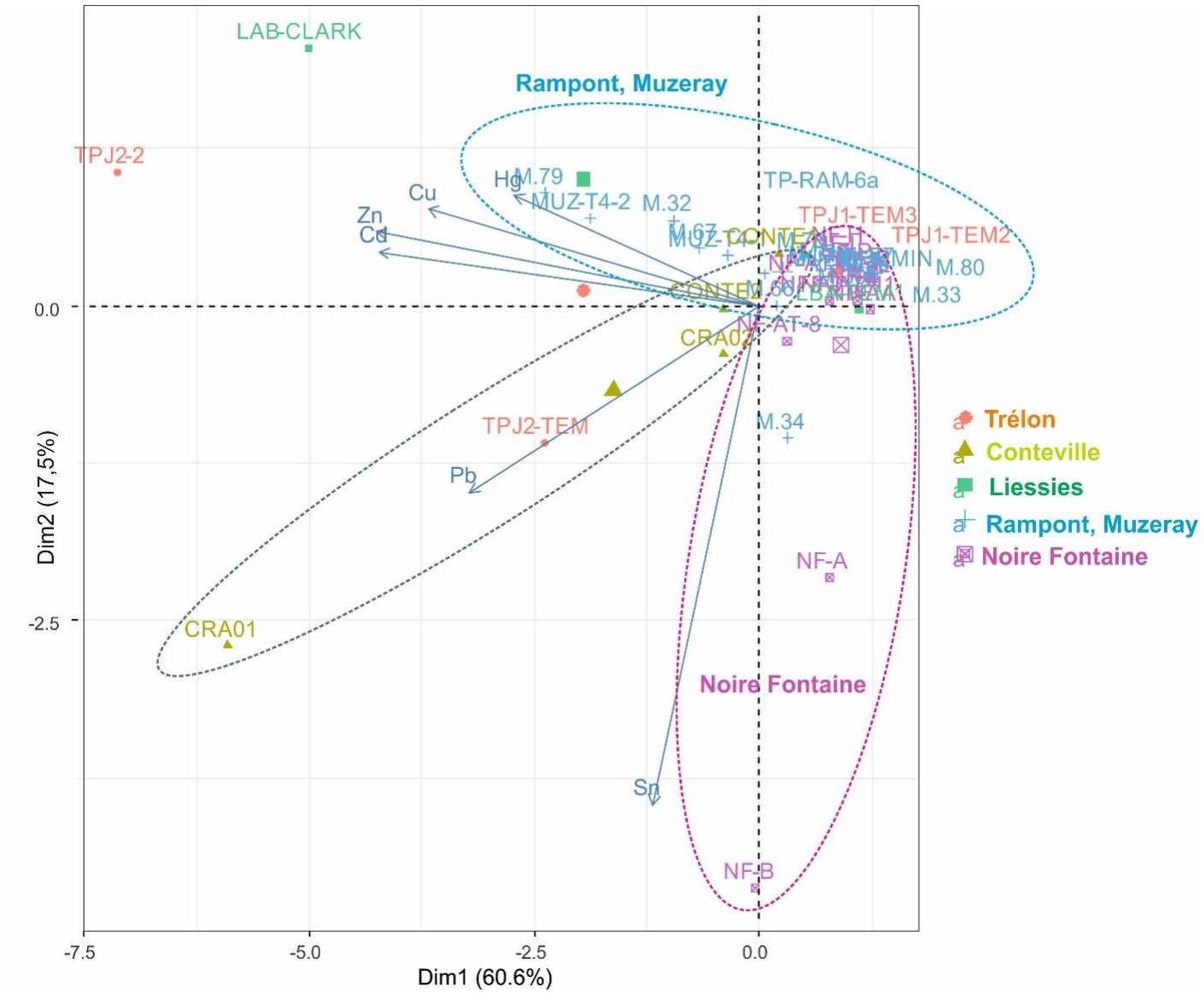


Figure 325 : Analyse en Composante Principale (ACP) centrée et normée sur l'ensemble de données à 7 variables (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sn, Zn) (biplot de corrélation).

Conclusion

L'analyse statistique exploratoire réalisée sur deux ensembles de données (([As], [Cd], [Pb], [Zn]) d'une part et ([As], [Cd], [Cu], [Hg], [Pb], [Sn], [Zn]) d'autre part) met en évidence des distributions des teneurs généralement asymétriques du fait de teneurs extrêmes présentes dans les résidus de brûlage associées à des teneurs proches ou égales à celles du fond géochimique local (des sols de l'environnement des résidus de brûlage).

L'ACP a permis d'extraire rapidement une quantité d'informations très intéressantes à partir d'un vaste jeu de données composé de deux ensembles considérant d'une part quatre éléments et d'autre part huit sites où le brûlage de munitions fut reconnu. Les faits marquants de cette analyse exploratoire sont d'abord la très bonne corrélation et représentation de Zn, Cd et en moindre mesure Cu, Hg sur l'axe factoriel de première dimension. Les teneurs en Pb sont indépendantes (non corrélées) de celles en Zn, Cd et celles en Sn indépendantes de Zn, Cd, Cu, Hg.

Pb pourrait être en partie lié à Cu et Hg alors qu'As serait plus étroitement lié à Zn, Cd qu'au Pb. Les variables corrélées à l'axe factoriel de première dimension possèdent une caractéristique notoire commune : elles correspondent aux teneurs d'ETM entrant dans la composition des métaux constitutifs des fusées d'artillerie ex-allemandes typiques de la fin de la guerre (alliages Al, Zn, Cu, Cd) et des amorces de ces fusées (au fulminate de mercure) comme démontré à la Section 1h du présent manuscrit. Cet axe serait donc celui de l'empreinte du brûlage des fusées d'artillerie ex-allemandes. Cet axe ressort des ACP pour les deux ensembles de données analysées. Selon l'ensemble de données considéré (et le nombre d'éléments et de sites pris en considération), l'axe de la seconde dimension est bien corrélé soit avec Pb (bien représenté sur cet axe avec des valeurs issues de la fosse de la « Place à gaz »), soit, lorsque le site de la « Place à gaz » n'est pas inclus dans les données, avec Sn. L'occurrence de Sn et Pb semblent donc dissociée de celle de Zn et Cd, le Pb et Sn trouvant donc des origines différentes de celles de Zn et de Cd.

4.1.5 Corrélations linéaires inter-élémentaires

Des corrélations significatives apparaissent entre ETM, permettant de discriminer différents groupes d'échantillons provenant de différents sites de brûlage. Il s'agit de celles identifiées au terme de l'ACP, et notamment l'interdépendance de Zn et de Cd, et de Zn et Cu.

Corrélations linéaires Cu / Zn

Cu et Zn sont normalement liés par les alliages de laiton (Cu_3Zn), métal dont furent constituées les fusées d'artillerie durant la Grande Guerre (le laiton ne provoquant aucune étincelle). On constate que les teneurs du Cu et du Zn sont en effet bien corrélées sur les sites de brûlage de Rampont alors qu'à Noire Fontaine au contraire le nuage de points est très étalé à des teneurs moindres se rapprochant ou équivalent au fond géochimique mais pas sur une droite correspondant au laiton (cf. Figure 326). Il faut voir ici l'influence des pratiques agricoles et du labour à Noire Fontaine qui ont eu tendance à étaler les résidus de brûlage, à les mêler aux sols naturels ce qui atténue les teneurs eu égard aux résidus initialement présents dans les tranchées de brûlage remaniées (effet de dilution). A Rampont, où l'aire de brûlage « dépotoir » est en partie en pâtures, et sur les autres sites de brûlage installés en environnement forestier, les terrains ont été laissés physiquement en l'état, non perturbés. Les distributions des couples [Cu]/[Zn] sont alors nettement plus ramassées.

A Rampont, les teneurs [Cu] et [Zn] sont très bien corrélées avec des teneurs de l'ordre de 10 fois plus élevées en Zn qu'en Cu. Les trois points de la zone polluée « Dépôt nord » de la « Place à gaz » s'alignent sur cette droite. Le nuage de points du terrain de brûlage n°2 du Parc Jeannette à Trélon, aussi situé sur cette droite, forme le pôle extrême des teneurs [Cu] comme [Zn].

Les autres terrains de brûlage se distinguent de cette droite par un excès de Cu par rapport à Zn. Cet étalement des teneurs notamment vers les basses teneurs constitue un artéfact lié au fait de la surreprésentation dans les ensembles de données de données extraites du fond géochimique local, une approche de caractérisation des milieux environnants qui n'a pas pu être entreprise à l'échelle des autres sites.

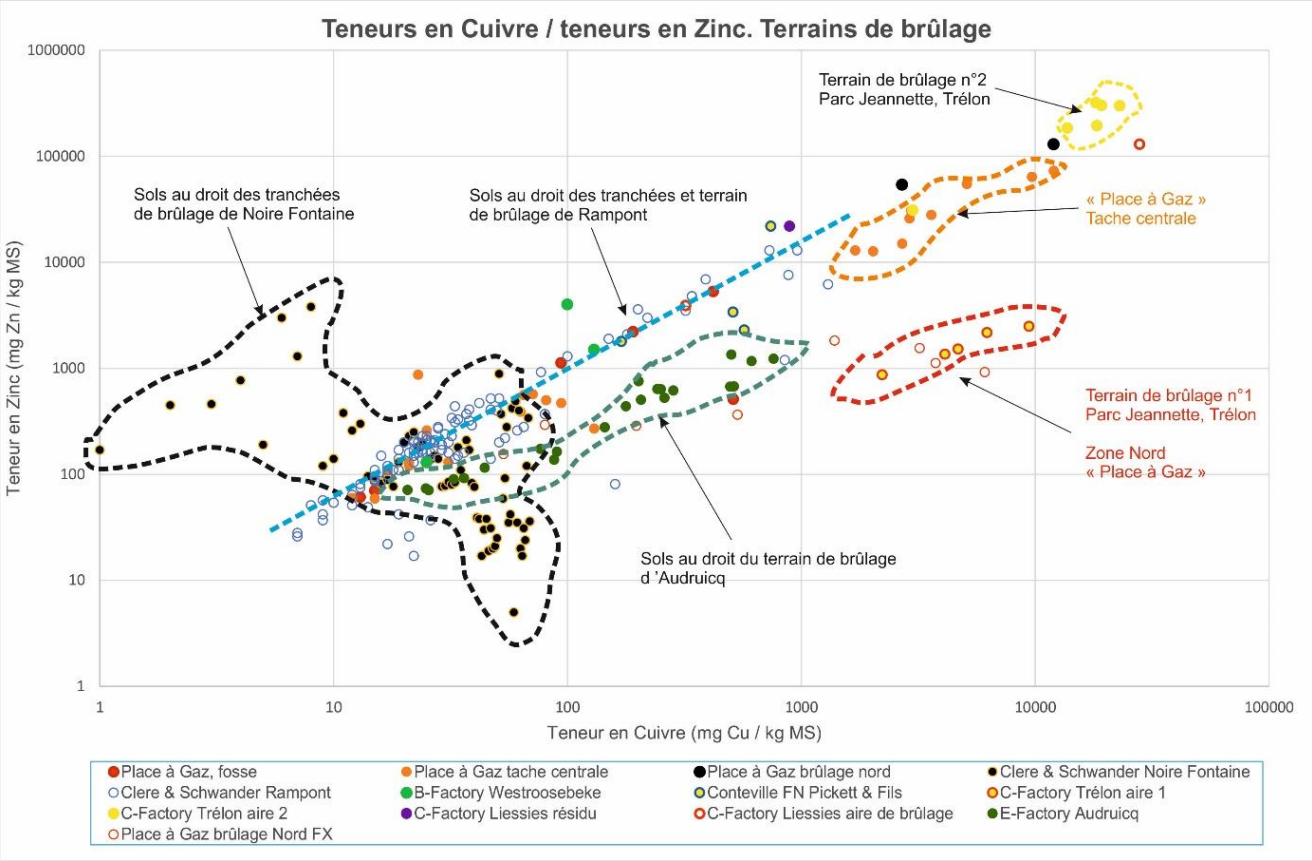


Figure 326 : Relations entre les teneurs en zinc et en cuivre dans les sols.

Corrélations linéaires As / Zn

L'interdépendance des teneurs en As et Zn dans les sols a été explorée car ces deux élements peuvent être issus de parties distinctes de projectiles de nature différente : (i) les engins à chargement chimique arséniés, ou (ii) les fusées d'artillerie à base d'alliages zingués, dont les munitions chimiques pouvaient aussi être dotées.

On constate que trois nuages de points [Zn]/[As] se différencient (cf. Figure 327). En premier lieu, les couples aux basses teneurs, nettement plus zinguées qu'arséniées, provenant d'échantillons de sols en environnement agricole du site de la *E-Factory* d'Audruicq. Ensuite, se détache un second nuage de points qui peut être qualifié d'arsénié autour d'un axe proche de la droite [Zn]/[As] ~1.

Se regroupent autour de cet axe les échantillons issus des sites de brûlage d'obus à *Croix bleue* de la « Place à gaz » (tache centrale et fosse nord-est), de la *B-Factory* de Westroozebeke et des tranchées de brûlage de Rampont et du puits et tranchées de brûlage de Noire Fontaine, alors que les échantillons issus des terrains de brûlage du Bois Jeannette à Trélon, du Bois l'Abbé à Liessies (*C-Factory* de F.N. Pickett & Fils), du « Bois Brûlé » à Conteville, de Rampont et de la zone Nord de la « Place à gaz » s'alignent sur un deuxième axe (troisième nuage de points) , pouvant être qualifié de « zingué ». Les points provenant du terrain de brûlage n°2 du Parc Jeannette à Trélon s'y distinguent par les teneurs en Zn et en As les plus élevées dans cette population d'échantillons. Le terrain n°1 (sud-ouest) du Parc Jeannette se détache par ses teneurs moindres en Zn et As que celles du terrain de brûlage n°2 (nord-est) du Parc Jeannette.

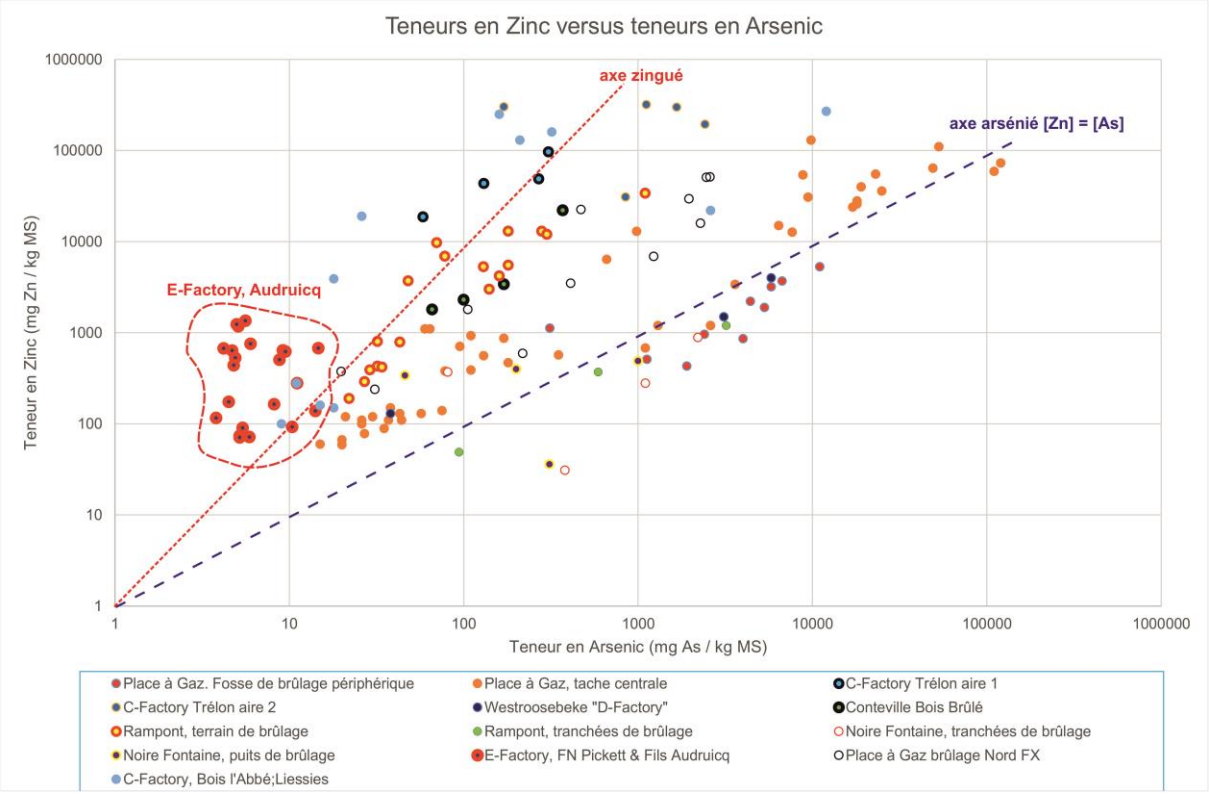


Figure 327 : Relations entre les teneurs en zinc et en arsenic.

Corrélations linéaires As / Pb

La corrélation entre teneurs en As et en Pb est mise en évidence (les teneurs en As et Pb augmentent globalement conjointement, avec un coefficient de détermination R^2 = 0,91) mais les couples de valeurs apparaissent plus dispersés autour de cet axe de corrélation (cf. Figure 328) comparativement à ceux As / Zn. Les différents sites semblent montrer des signatures très distinctes les uns des autres avec toutefois un *overlap* des nuages de points avec celui très étalé relatif à la tache centrale de la « Place à gaz ». La fosse nord-est du même site présentent les couples [As] / [Pb] les plus élevés. Les teneurs à Audruicq montrent que l'As est un élément mineur proche du fond pédogéochimique naturel local alors que le Pb y apparait anomale.

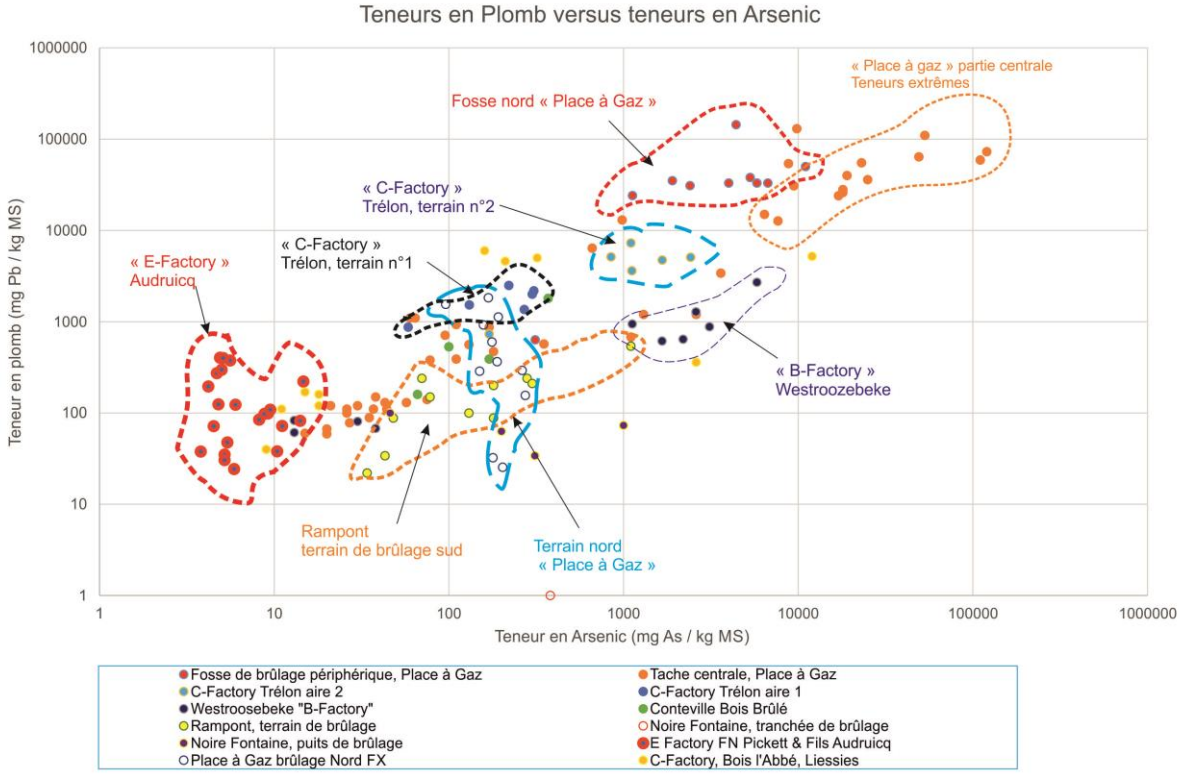


Figure 328 : Relations entre les teneurs en plomb et en arsenic.

Corrélations linéaires Zn / Cd et Zn / Hg

Une autre corrélation remarquable identifiée dans le cadre de cette recherche est celle mise en évidence par l'ACP entre Zn et Cd (cf. Figure 329). Cd est intimement lié à Zn par un rapport proche de [Zn]= 1 000 [Cd] (coefficient de détermination R^2 proche de 0,99) quel que soit le site étudié, à l'exclusion du site d'Audruicq dont le nuage de points est positionné sous cette droite ([Zn] < 1 000 [Cd]), avec des teneurs en Zn relativement plus faibles. Sur cette droite, les teneurs les plus fortes concernent les terrains de brûlage de la « Place à gaz », du Parc Jeannette (terrain n°2, nord-est) à Trélon, du Bois l'Abbé à Liessie.

A noter que sur ce dernier site, les résidus de brûlage présentent une forte densité : (i) de fragments millimétriques d'alliage Al-Cu-Zn typique des fusées d'artillerie allemandes de la fin de la guerre et (ii) d'éléments des mécanismes des fusées en Cu ou en alliage Al-Cu-Zn (masselottes, percuteurs, ressors, etc.) (l'équivalent des laitons haute résistance).

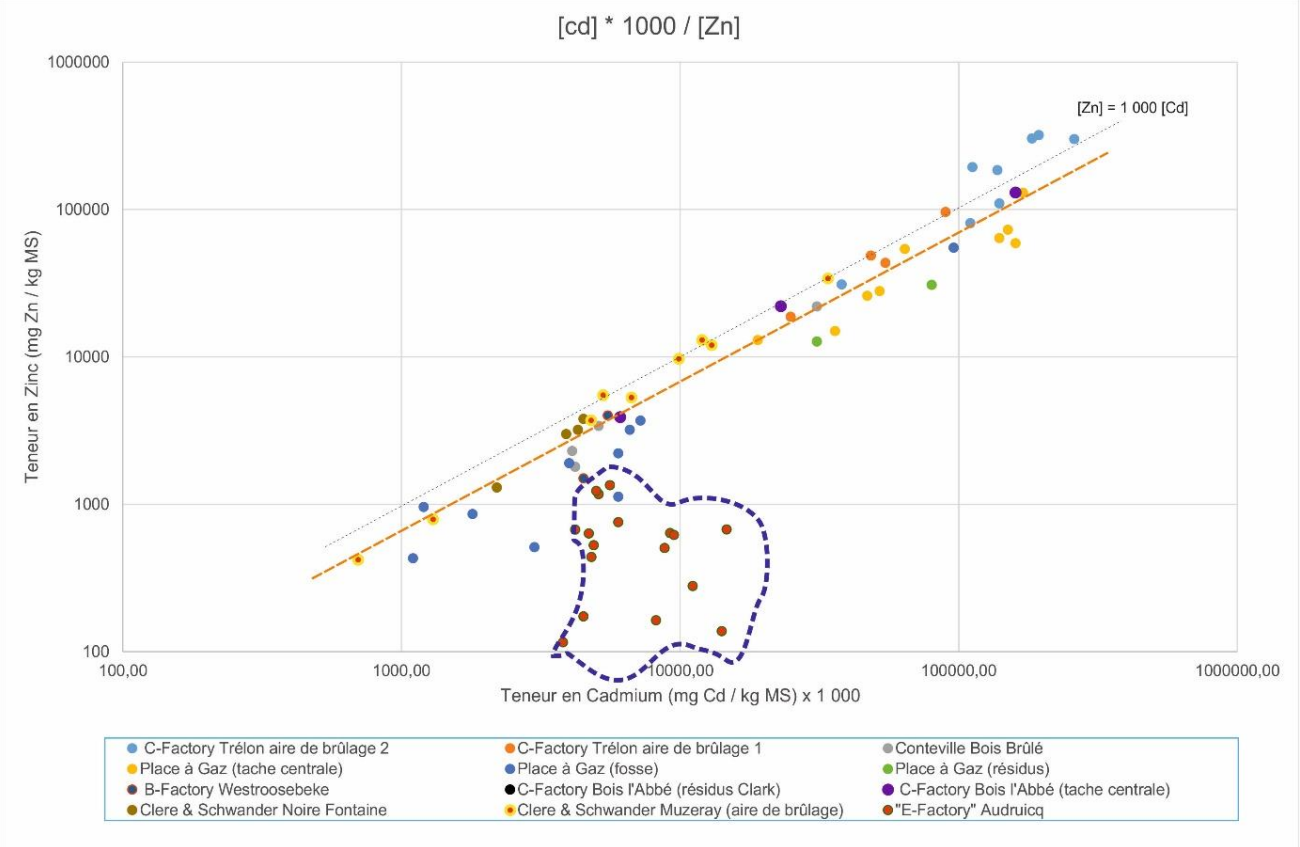


Figure 329 : Relations entre teneurs en zinc et en cadmium.

Particulièrement intéressante est l'exploration de la relation entre les teneurs en Zn, constituant l'un des éléments des alliages des fusées d'Artillerie allemande de la fin de la guerre, et Hg, métal complexe, réactif et toxique, qui entrait dans la composition des amorces de ces fusées, à base de fulminate de Hg. Les teneurs en Zn ne semblent pas être corrélées à celles de Hg. On dénote toutefois que les teneurs les plus élevées en Hg sont aussi celles d'échantillons montrant les plus fortes teneurs en Zn.

4.2. CHLORURE, CHLORATE, PERCHLORATE, NITRATE ET AMMONIUM

Les ions perchlorate (ClO_4^-) n'ont été recherchés que dans cinq échantillons composite de résidus de brûlage de la « Place à gaz » pour l'analyse au laboratoire après lixiviation (rapport liquide solide 1kg / 1 litre) (cf. Tableau 51). Les ions perchlorate sont présents dans ces résidus mais leurs teneurs n'excèdent pas 1,4 $mg.kg^{-1}$ (1,4 $mgClO_4.L^{-1}$ dans les éluats sur 1 kg d'échantillon composite). Les teneurs en chlorures lixiviables sont par contre élevées (jusqu'à 1 392 $mg.L^{-1}$), très certainement liées à la décomposition thermique des chlorures de diphénylarsine.

	Date d'échantillonnage	Localisation	Cl -(Chlorure)	ClO_3^- (Chlorate)	ClO_4^- (Perchlorate)	NH_4^+(Ammonium exprimé en NH_4)	NO_3^- (Nitrate exprimé en NO_3)
Méthode	-	-					
Limite de quantification (LQ)	-	-	0,5	0,1	0,5	0,05	0,5
Unité	-	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
SPIN-01-EL	avr-14	Fosse de brûlage	**690,6**	< LQ	**0,7**	0,35	23,9
SPIN-02-EL	avr-14	Tache centrale	**1236,7**	< LQ	**0,6**	< LQ	5,5
SPIN-03-EL	avr-14	Tache centrale	**1094,7**	< LQ	**1,4**	< LQ	5,8
SPIN-04-EL	avr-14	Périphérie	**1336,3**	< LQ	**0,6**	2,71	< LQ
SPIN-05-EL	avr-14	Périphérie	**1392,3**	< LQ	**1,1**	1,97	< LQ

Tableau 51 : Concentrations en chlorure, chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium sur lixiviats des échantillons composites constitués au droit et aux abords du site de brûlage de la « Place à gaz » (laboratoire du BRGM).

Ces sels chlorés ou azotés sont extrêmement solubles, et ne se sorbent pas sur les particules organiques et inorganiques des matériaux ; ils ne peuvent persister dans les sols de surface exposés aux eaux météoriques mais, s'ils étaient présents dans les résidus de brûlage, peuvent avoir été transférés dans les sols plus profonds à la faveur de l'infiltration des eaux météoriques. Bausinger (2008)[1946] mit en évidence par l'analyse (par chromatographie ionique) de 76 échantillons d'eau porale extraite par des bougies poreuses, et huit échantillons d'eau de formation issues de piézomètres superficiels (eaux), au droit et aux abords du terrain de brûlage de la « Place à gaz », la présence de concentrations en chlorures s'élevant jusqu'à 45,8 $mg^-.L^{-1}$, en fluorure de 0,4 $mg.L^{-1}$, en sulfates de 77,7 $mg^-.L^{-1}$. En un point, les ions chlorate ont été détectés à des concentrations élevées, jusqu'à 73,7 mg. L^{-1}. Les ions perchlorate ont été détectés à l'état de traces (concentrations proches des limites de quantification, LQ) en un seul point.

Globalement, les eaux porales s'avèrent marquées par les composés solubles issus des résidus de brûlage se traduisant par une minéralisation (conductivité électrique) assez élevée de ces eaux, comprise entre 87 et 2 430 $\mu S.cm^{-1}$. Ions chlorate et perchlorate n'apparaissent pas, dans le cas du terrain de brûlage de la « Place à gaz », comme étant des polluants majeurs des sols et des eaux porales, en lien avec les opérations de brûlage. A noter qu'il n'est fait, à l'exception des sites Bouxin des Burettes (département de l'Isère) et éventuellement d'Illkirch (département du Bas-Rhin), aucune mention d'opérations de brûlage visant spécifiquement des munitions ou matériaux chlorates ou perchlorates.

4.3. COMPOSES NITROAROMATIQUES ET RESIDUS DES POUDRES ET EXPLOSIFS

4.3.1 Typologie de la population de données

Les analyses des NAC des explosifs de la Première Guerre mondiale ont été réalisées sur des échantillons de sol et de résidus de brûlage collectés à la faveur d'investigations détaillées ou exploratoires sur des sites de brûlage de munitions, identifiés en France comme en Belgique. Les données concernant les sites d'Audruicq et de Zweedorf ont été mises à disposition par respectivement T. Bausinger et J. Preuss (tous deux de l'université de Mayence, Allemagne, au moment de la production des données).

[1946] Bausinger, T., Preuss, J. (2011). *Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunitionim Wald von Spincourt (Frankreich)*. Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften. Geographisches Institut. Johannes Gutenberg Universität. Mainz August 2011. Communication personnelle. Non publié.

Les résultats analytiques forment une population de données originale mais hétérogène du fait d'une part (i) des degrés d'approfondissement des investigations et études de sites assez contrastés (entre des études exploratoires à Trélon, Liessies et Conteville et celles détaillées de la « Place à gaz » et de Clere & Schwander dans le canton de Spincourt), et d'autre part (ii) de l'évolution des développements analytiques (et donc de la liste des paramètres analytiques qu'il est possible de rechercher) au fil du processus de recherche et d'investigations.

Les listes analytiques appliquées aux échantillons collectés ont été ajustées à l'avancement à l'état des connaissances des cortèges de polluants présents, aux objectifs des caractérisations et aux contraintes financières du moment (les coûts analytiques sont en effet élevés et le budget disponible fini).

A noter que des analyses menées par l'ANSES sont le fruit d'importants développements analytiques sur plusieurs années pour doter le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de méthodes permettant, sur des matrices liquides comme les éluats (analyses après lixiviation standard), de rechercher et doser quantitativement plus de 50 substances typiques des explosifs et propulseurs des deux guerres mondiales, leurs principaux sous-produits de transformation environnementale, leurs adjuvants et impuretés.

Ces résultats sont difficilement exploitables sur le plan statistique du fait d'effets pépite induits par de très fortes teneurs (> 1 000 $mg.kg^{-1}$), issue d'analyses par lixiviation ou sur brut, côtoyant à quelques mètres près, selon les sites, d'autres teneurs assimilées à des traces (< 1 $mg.kg^{-1}$). Cet effet pépite, qui se manifeste par l'absence de gradient de teneur, est caractéristique des pollutions induites par les explosifs, et autres polluants dispersés dans l'environnement sous forme particulaire ou de fragments. Les teneurs exceptionnellement élevées, comme celles mesurées dans certains résidus de tranchées à Noire Fontaine, sont typiquement le résultat de la présence dans l'échantillon de particules résiduelles d'explosif. Les recherches nord-américaines (Taylor et al., (2004)[1947]) démontrent que l'augmentation du nombre de prise d'échantillons unitaires pour former les échantillons composites analysés au laboratoire permet de lisser l'effet pépite, de réduire la variabilité et d'accroitre la représentativité des échantillons (les résultats se distribuant alors selon une loi de probabilité normale).

4.3.2 Extractions par lixiviation à l'eau versus extractions aux solvants. Une approche comparative

Les premières analyses dites « exploratoires » ont été réalisées sur des échantillons composites de sol et résidus (au nombre de 22) collectés sur les sites de la « Place à gaz », de l'usine Clere & Schwander de Rampont et des installations de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine.

Ces premières analyses ont été effectuées sur les éluats après lixiviation sous agitation de 24 heures avec un ratio liquide solide de 1 litre pour 1 kg sur un large spectre de substances, rassemblant les NAC polaires et apolaires et leurs sous-produits de transformation environnementale.

[1947] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit.*

Cette approche recommandée par LfU (2009)[1948] pour la recherche des pollutions induites par les résidus d'explosifs dans les sols, permet en effet de limiter les risques d'effets pépite liés à la présence d'éléments solides et particulaires d'explosifs dans les sols, et de rendre compte globalement, de la présence dans ces matériaux de composés issus des explosifs et mobiles dans l'environnement. Ces analyses étaient destinées à explorer pour chacun de ces sites la nature des cortèges de substances en présence. L'essentiel des analyses, réalisées sur les échantillons provenant de l'ensemble des terrains de brûlage (portant sur un nombre de 91 échantillons), a été effectué sur des échantillons composites de sol, puis analysés sur brut après extraction aux solvants organiques (acétonitrile, méthanol) considérant les enseignements des premières analyses exploratoires sur lixiviat. Cette dualité des approches analytiques contribue à accroître, a priori, le caractère hétérogène de la population de données. Une approche comparative des deux méthodes d'extraction (par lixiviation à l'eau et par solvants organiques) a été entreprise sur un échantillon provenant d'un secteur particulier et d'extension réduite (environ 7 x 7 m) du site de désobusage de Noire Fontaine. Il se caractérise par l'occurrence dans et sur les sols d'une forte densité de fragments centimétriques (*chunks*) à millimétriques (*flakes*) d'explosifs brun foncé à noir finement cristallisés (cf. Figure 330). Les analyses au laboratoire (cf. Section 1h du présent manuscrit) montrent que la composition de ces fragments est complexe, renfermant des isomères des DNT, TNT et DNN ainsi qu'un irritant (le N-éthylcarbazole). La zone d'affleurement de ces explosifs coïncide avec celle des découvertes des fioles d'arsine vides et, pour l'une d'entre elle, encore chargée. Des fragments de TNT, bruns, du même type ont été découverts au droit de l'usine Clere & Schwander de Rampont (Muzeray) sur un secteur très localisé, à l'origine du marquage significatif d'un échantillon en TNT (cf. Figure 330). Dans ces deux cas de figure, les sols apparaissent composés d'éléments naturels et ne correspondent pas à des résidus de brûlage.

Figure 330 : Eléments centimétriques d'explosifs (chunks) sur les sols du site Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) à gauche et élément centimétrique isolé de TNT sur les sols du site Clere & Schwander de Rampont (Muzeray)[1949].

[1948] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*, *op. cit.*

[1949] Hubé, D. Juillet 2015.

Ces éléments n'ont pas été introduits dans ces sols par pétardement (*Open Detonation*), ou par brûlage (*Open Burning)* mais probablement consécutivement à des opérations de démontage de projectiles. Les résultats analytiques obtenus sur cet échantillon ont été rassemblés dans le Tableau 52 suivant.

Composé	**NF-AT-1 (zone à « *chunk* » de TNT)**		
	Après extraction aux solvants	Après extraction à l'eau par lixiviation 1 kg / 1 litre	Ratio Extraction / lixiviation
	µg.kg^{-1}		-
2-Amino-4,6-dinitrotoluène (2ADNT)	**10 600**	**893**	11,87
4-Amino-2,6-dinitrotoluène (4ADNT)	**19 000**	**1 951**	9,74
3,5-Dinitroaniline (3,5-DNA)	<50	**64,2**	-
2,4-Dinitrotoluène (2,4-DNT)	**870**	**62,9**	13,83
2,6-Dinitrotoluène (2,6-DNT)	<50	**39,5**	-
1,3,5-Trinitrobenzène (1,3,5-TNB)	**2 830**	< 10	-
2,4,6-Trinitrotoluène (2,4,6-TNT, *Tolite*)	**613 000**	**37 602**	16,30
1,3-Dinitrobenzène (1,3-DNB)	**2 380**	**137**	17,37
1,5-Dinitronaphthalène (1,5-DNN)	**46 600**	**10,3**	**4 524,27**
1,8-Dinitronaphthalène (1,8-DNN)	**30 200**	**7,88**	**3 832,49**
1,3,5-Trinitronaphthalène (1,3,5-TNN)	**23 900**	**1,00**	**23 900,00**
1,3,8-Trinitronaphthalène (1,3,8-TNN)	**226 000**	**20,8**	**10 865,38**
1,4,5-Trinitronaphthalène (1,4,5-TNN)	**63 000**	< 0,50	-
Acide 2-amino-4,6-dinitrobenzoïque (A2ADNB)	<50	**186**	-
Acide 4-amino-2,6-dinitrobenzoïque (A4ADNB)	<50	**13,4**	-
2,4,6-Trinitrophénol (2,4,6-TNP, *Mélinite*)	**1 830**	**18,7**	97,86
Acide 2,4,6-trinitrobenzoïque (A2,4,6TNB)	<50	**3,45**	-

Tableau 52 : Résultats analytiques comparatifs (entre extraction aux solvants organiques et lixiviation à l'eau) sur un échantillon composite de sol marqué par la présence d'éléments visibles d'explosifs issu du site de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt (Envilytix GmbH).

Cette comparaison se réduit à un échantillon et les conclusions tirées ne sauraient être généralisées et transposées à tout échantillon collecté sur des sites marqués par les explosifs. Cet exemple sur un échantillon de sols très impacté par les résidus d'explosif met clairement en exergue (i) que les deux méthodes d'extraction livrent les mêmes signatures chimiques dominées par le TNT et ses métabolites (ADNT), (ii) des écarts forts entre les teneurs après extraction à l'eau et extraction aux solvants, la lixiviation à l'eau les minimisant presque tous par rapport à celles issues par l'extraction aux solvants, (iii) que les écarts les plus significatifs concernent les composés à haut poids moléculaires comme les isomères des di-, tri-nitronaphtalènes qui sont nettement plus extraits par les solvants organiques possiblement du fait de leur moindre solubilité à l'eau. L'écart entre « extractibilité » à l'eau et aux solvants organiques augmente donc avec le poids moléculaire des nitronaphtalènes. Il existe peu de données publiées concernant la solubilité de ces composés, mais il est vraisemblable qu'elle soit bien moindre que celles des isomères de moindre poids moléculaire, apolaires eux aussi comme le TNT. Mais la solubilité n'est possiblement pas le seul paramètre contrôlant l'extraction des polluants à l'eau.

Il convient de considérer certaines particularités des résidus de brûlage et notamment le potentiel d'adsorption et de rétention des polluants sur le solide (coefficient d'adsorption Kd, ou K_{oc} sur la matière organique), car en effet, il a été démontré que ces matériaux sont particulièrement riches en (i) oxyhydroxydes de fer, (ii) éléments charbonneux mis en évidence puis caractérisés par MEB par Thouin (2016)[1950] dans les résidus de la tache centrale de la « Place à gaz ».

Les composés nitrés nitroaromatiques possèdent une forte affinité pour ces matrices qui réduisent fortement leur mobilité par des mécanismes de sorption. On rappelle que le Charbon Actif Granulaire (CAG) est couramment utilisé en dépollution pour piéger par sorption des polluants présents dans les effluents aqueux et gazeux.

L'extraction par la lixiviation à l'eau sur un kilogramme d'échantillon composite de matériaux va rendre globalement compte, à l'échelle de l'intégralité de l'échantillon, des cortèges de molécules mobiles, solubles, en présence, en lissant les effets pépite mais tout en minimisant les teneurs et les masses réellement présentes dans l'échantillon. Cette approche est parfaitement adaptée aux évaluations des risques de pollution des eaux souterraines par des polluants introduits dans les sols, la lixiviation à l'eau s'approchant des conditions environnementales de mobilisation des polluants par les eaux météoriques infiltrées.

A contrario, les solvants organiques extraient toutes les molécules organiques présentes dans les quelques mg de matériaux des aliquotes tirés des échantillons composites au laboratoire. Cette prise ponctuelle de sous-échantillons expose aux risques d'effets pépite et ne rend pas compte des conditions de mobilisation environnementale des polluants présents dans les matériaux analysés.

Les deux méthodes d'extraction sont donc complémentaires mais ne peuvent être raisonnablement appliquées systématiquement sur un nombre important d'échantillons.

Cet exemple illustre parfaitement la complexité d'une caractérisation exhaustive et représentative des pollutions des sols générées par les composés d'origine pyrotechnique du fait (i) de la grande diversité de composés susceptibles d'avoir été introduits, (ii) du grand nombre de sous-produits découlant de processus biotiques et abiotiques de transformation environnementale, (iii) de la nature solide, particulaire et discrète des polluants et (iiii) des contrastes de mobilité (solubilité) au contact de l'eau. Ces diagnostics et caractérisations des pollutions d'origine pyrotechnique portent en eux d'inévitables incertitudes, difficilement quantifiables, inhérentes à la distribution spatiale des teneurs en polluants dans les sols et donc des masses en présence.

4.3.3 Présentation des résultats analytiques

Les résultats analytiques sur lesquels se base le développement qui suit sont rassemblés en Annexe G du présent manuscrit.

Les métaux et métalloïdes identifiés à des teneurs très élevées dans les résidus de brûlage des sites étudiés sont associés à un cortège de NAC mesurables, quantifiables, mais présents à des teneurs significativement plus faibles comparativement à celles des ETM, majoritairement inférieures à 10 $mg.kg^{-1}$ MS (cf. Tableaux 53 à 57 et Figures 331 à 335)

[1950] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit.*

Les teneurs les plus élevées (de plusieurs dizaines de $mg.kg^{-1}$ MS) concernent les résidus de brûlage allochtones, visiblement isolés, déposés en périphérie des terrains de brûlage *sensu stricto*. Les teneurs en NAC peuvent s'avérer élevées par ailleurs lorsque les explosifs se présentent dans les échantillons de sol à l'état dispersé et particulaire (comme cela a été décrit dans ce qui précède à Noire Fontaine).

Les faibles teneurs en résidus d'explosifs nitrés comparativement à celles en ETM sont cohérentes avec les intentions des brûlages au regard des archives historiques consultées. Le brûlage avait vocation à détruire thermiquement les explosifs dans des foyers à haute température pour décharger les engins. La combustion des chargements explosifs libéra essentiellement des gaz comme N_2, NO_2, H_2O, CO_2 etc. qui ne marquèrent pas les sols mais ponctuellement, au moment de la combustion, l'air atmosphérique, contrairement aux métaux qui ne sont pas détruits mais libérés dans les sols par la combustion.

Dans les résidus allochtones, comme ceux de la « Place à gaz » ou de Trélon Liessies, les cortèges sont majoritairement dominés par les isomères des di- et tri-nitronaphtalènes et des traces des sous-produits de transformation environnementales des NAC.

On retrouve de façon quasi systématique des traces d'isomères d'amino-dinitrotoluène (ADNT) montrant que des processus de biotransformation des explosifs primaires (comme le TNT) s'opèrent dans ces matériaux et sols. Les acides nitrobenzoïques sont aussi détectés (< 10 $mg.kg^{-1}$ MS lorsqu'ils ont été recherchés) attestant de mécanismes de photo-oxydation dans les environnements de surface.

D'une manière générale :

1) Il n'existe pas d'écarts notoires entre les signatures chimiques acquises sur les échantillons analysés après lixiviation, et ceux, plus nombreux, obtenus par analyses après extraction sur brut par solvants organiques ; les nombres les plus élevés de détections concernent dans les deux cas les <u>isomères (i) des di-, tri-nitronaphtalènes (DNN, TNN). (ii) des dinitrobenzènes (DNB) et (iii) des amino-dinitrotoluènes (ADNT)</u>. Le nombre d'espèces détectées après lixiviation est plus élevé que celui faisant suite par une extraction aux solvants ;

2) Les <u>sites de brûlage de munitions chimiques</u> (« Place à gaz, Trélon et Liessies, Westroozebeke, Noire Fontaine et Rampont) ont en commun le marquage des résidus de brûlage et des sols par les <u>di-, tri-nitronaphtalènes, le TNT et ses métabolites et en moindre mesure les DNB</u>. La fréquence de détection, ainsi que les teneurs, les plus élevées concernent les isomères du trinitronaphtalène (en particulier de 1,3,8-TNN), le TNT et les isomères des DNB (en particulier le 1,3-DNB). Il n'existe pas pour ces résidus d'explosifs sur ces sites de réelles disparités dans les cortèges de composés. La variabilité concerne les teneurs ;

3) Lorsque les teneurs en NAC sont très faibles (traces < 1 $mg.kg^{-1}$ MS), les espèces prédominantes sont les métabolites du TNT et en particulier les isomères des ADNT (comme notamment à Audruicq, sur le terrain de brûlage du Bois l'Abbé à Liessies). Les explosifs ont été dégradés dans les sols et dans les conditions d'exposition environnementale en métabolites persistants et mobiles et en particulier en ADNT,

4) Le site de brûlage du Bois Brûlé à Conteville (très vraisemblablement lié à l'usine F.N. Pickett & Fils et/ou à ses prédécesseurs) s'individualise des autres sites étudiés par la prédominance du TNT à une teneur maximale mesurée (sur seulement deux échantillons analysés) de 26,3 mg.kg^{-1} MS soit 80% de la somme des teneurs de tous les NAC présents dans ces échantillons. A Audruicq (*E-Factory* de F.N. Pickett & Fils). ces composés n'ont été détectés par T. Bausinger qu'à l'état de traces dominées par le TNT et ses métabolites (ADNT) et, contrairement aux autres terrains de brûlage, ne montre pas d'occurrence des di-, tri-nitronaphtalènes ; les résultats des analyses sur les métaux et métalloïdes confirment que ces terrains de brûlage se distinguent des autres *Burning Grounds* étudiés dans le nord, l'est de la France et en Belgique : les teneurs en ETM sont très proches du fond géochimique à Audruicq tandis que les résidus du Bois Brûlé sont très riches en zinc et en moindre mesure en étain.

Nombre d'échantillons dans lesquels au moins un composé a été quantifié	38	41,76%			
	Nombre d'analyses	Nombre de quantifications	Taux de quantification	Min (µg/L)	Max (µg/L)
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	91	24	26,37%	0,035	19
4-Amino-2,6-dinitrotoluène	91	34	37,36%	0,05	4,96
Somme des Amino-dinitrotoluènes	91	34	37,36%	0,05	23,96
4-Amino-2-nitrotoluène	91	0	0,00%	<	<
3,5-Dinitroaniline	91	5	5,49%	0,07	0,91
2,4-Dinitrotoluène	91	9	9,89%	0,07	1,31
2,6-Dinitrotoluène	91	2	2,20%	0,19	0,29
Somme des Dinitrotoluènes	91	11	12,09%	0,07	1,31
2,4,6-Trinitrotoluène	91	22	24,18%	0,08	1347
1,2-Dinitrobenzène	91	7	7,69%	0,09	2,87
1,3-Dinitrobenzène	91	26	28,57%	0,05	8,26
Somme des Dinitrobenzènes	91	26	28,57%	0,05	8,58
1,3,5-Trinitrobenzène	91	10	10,99%	0,05	12,9
2-Nitroaniline	91	9	9,89%	0,05	0,89
3-Nitroaniline	91	4	4,40%	0,07	0,88
Somme des Nitroanilines	91	10	10,99%	0,05	1,23
1-Nitronaphthalène	91	1	1,10%	0,24	0,24
2-Nitronaphthalène	91	0	0,00%	<	<
Somme des Mononitronaphtalènes	91	1	1,10%	0,24	0,24
1,3-Dinitronaphthalène	91	2	2,20%	0,09	0,1
1,5-Dinitronaphthalène	91	25	27,47%	0,06	17,8
1,6-Dinitronaphthalène	43	3	6,98%	0,08	0,63
1,8-Dinitronaphthalène	91	34	37,36%	0,05	90,5
Somme des Dinitronaphtalènes	91	35	38,46%	0,05	90,5
1,3,5-Trinitronaphthalène	91	6	6,59%	0,13	42,9
1,3,8-Trinitronaphthalène	91	22	24,18%	0,06	449
1,4,5-Trinitronaphthalène	91	9	9,89%	0,1	147
Somme des Trinitronaphtalènes	91	22	24,18%	0,06	638,9
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	46	4	8,70%	0,21	1,84
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque	46	0	0,00%	<	<
Somme des Acides amino-dinitrobenzoïques	46	4	8,70%	0,21	1,84
Acide 2,4-Nitrobenzoïque	27	6	22,22%	0,16	7,74
Acide 2,6-Nitrobenzoïque	27	0	0,00%	<	<
Somme des Acides nitrobenzoïques	27	6	22,22%	0,16	7,74
2-Nitrophénol	27	0	0,00%	<	<
3-Nitrophénol	27	0	0,00%	<	<
4-Nitrophénol	27	0	0,00%	<	<
Somme des Nitrophénols	27	0	0,00%	<	<
2,4-Dinitrophénol	27	0	0,00%	<	<
2,6-Dinitrophénol	27	0	0,00%	<	<
Somme des Dinitrophénols	27	0	0,00%	<	<
2,4,6-Trinitrophénol	27	1	3,70%	1,56	1,56
Somme des composés nitroaromatiques polaires	27	1	3,70%	1,56	1,56
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque	27	0	0,00%	<	<

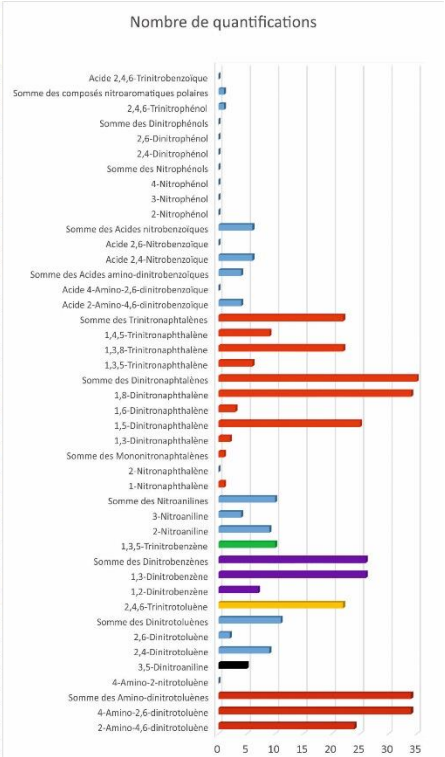


Tableau 53 : Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Envilytix GmbH) des échantillons composites solides sur brut (extraction aux solvants) et fréquences de détection. Hors site de Zweedorf (Allemagne).

Nombre d'échantillons dans lesquels au moins un composé a été quantifié	22	55,00%			
	Nombre d'analyses	Nombre de quantifications	Taux de quantification	Min (µg/L)	Max (µg/L)
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	40	5	12,50%	1,12	893
4-Amino-2,6-dinitrotoluène	40	6	15,00%	0,58	1951
Somme des Amino-dinitrotoluènes	40	6	15,00%	0,62	2844
4-Amino-2-nitrotoluène	40	<	<	<	<
3,5-Dinitroaniline	40	2	5,00%	0,88	64,2
2,4-Dinitrotoluene	40	2	5,00%	1,82	62,9
2,6-Dinitrotoluène	40	2	5,00%	10,1	39,5
Somme des Dinitrotoluènes	40	2	5,00%	11,92	102,4
2,4,6-Trinitrotoluène	40	10	25,00%	0,73	37602
1,2-Dinitrobenzène	40	1	2,50%	0,85	0,85
1,3-Dinitrobenzène	40	11	27,50%	0,57	137
Somme des Dinitrobenzènes	40	11	27,50%	0,57	137
1,3,5-Trinitrobenzène	40	<	<	<	<
2-Nitroaniline	40	2	5,00%	1,03	5,09
3-Nitroaniline	40	1	2,50%	22,5	22,5
Somme des Nitroanilines	40	2	5,00%	1,03	27,59
1-Nitronaphthalène	40	<	<	<	<
2-Nitronaphthalène	40	<	<	<	<
Somme des Mononitronaphtalènes	40	<	<	<	<
1,3-Dinitronaphthalène	40	<	<	<	<
1,5-Dinitronaphthalène	40	14	35,00%	0,51	10,3
1,6-Dinitronaphthalène	40	<	<	<	<
1,8-Dinitronaphthalène	40	17	42,50%	0,85	7,88
Somme des Dinitronaphtalènes	40	19	47,50%	0,51	18,18
1,3,5-Trinitronaphthalène	40	2	5,00%	0,57	1
1,3,8-Trinitronaphthalène	40	6	15,00%	1,26	74,6
1,4,5-Trinitronaphthalène	40	2	5,00%	2,07	2,33
Somme des Trinitronaphtalènes	40	6	15,00%	1,26	76,67
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	40	4	10,00%	3,67	186
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque	40	3	7,50%	3,89	13,4
Somme des Acides amino-dinitrobenzoïques	40	4	10,00%	3,67	199,4
Acide 2,4-Nitrobenzoïque	40	1	2,50%	32,3	32,3
Acide 2,6-Nitrobenzoïque	40	1	2,50%	3,86	3,86
Somme des Acides nitrobenzoïques	40	1	2,50%	36,16	36,16
2-Nitrophénol	40	<	<	<	<
3-Nitrophénol	40	<	<	<	<
4-Nitrophénol	40	<	<	<	<
Somme des Nitrophénols	40	<	<	<	<
2,4-Dinitrophénol	40	<	<	<	<
2,6-Dinitrophénol	40	<	<	<	<
Somme des Dinitrophénols	40	<	<	<	<
2,4,6-Trinitrophénol	40	2	5,00%	18,7	86,4
Somme des composés nitroaromatiques polaires	40	2	5,00%	18,7	86,4
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque	40	2	5,00%	1,44	3,45

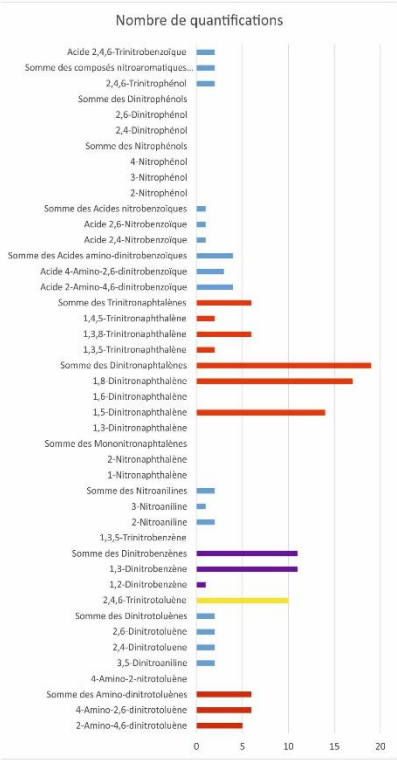


Tableau 54: Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Envilytix GmbH) des échantillons composites solides sur lixiviat (extraction à l'eau) et fréquences de détection. Hors site de Zweedorf (Allemagne).

Nombre d'échantillons dans lesquels au moins un composé a été quantifié		27	69,23%		
	Nombre d'analyses	Nombre de quantifications	Taux de quantification	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)
2,4-Dinitrotoluène	39	<	<	<	<
2,6-Dinitrotoluène	39	<	<	<	<
3,4-Dinitrotoluène	39	<	<	<	<
Somme des Dinitrotoluènes	39	<	<	<	<
1,2-Dinitrobenzène	39	11	28,21%	0,02	402
1,3-Dinitrobenzène	39	17	43,59%	0,05	5230
1,4-Dinitrobenzène	39	3	7,69%	1,6	36,3
Somme des Dinitrobenzènes	**39**	**17**	**43,59%**	**0,05**	**5668,3**
1,3,5-Trinitrobenzène	**39**	**8**	**20,51%**	**0,1**	**7,9**
2,4,6-Trinitrotoluène	**39**	**24**	**61,54%**	**0,02**	**2080**
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	39	24	61,54%	0,02	30,8
4-Amino-2,6-dinitrotoluène	39	22	56,41%	0,02	41,8
Somme des Amino-dinitrotoluènes	**39**	**24**	**61,54%**	**0,04**	**72,6**
2-Amino-4-nitrotoluène	39	<	<	<	<
2-Amino-6-nitrotoluène	39	<	<	<	<
Somme des Amino-nitrotoluènes	39	<	<	<	<
1,5-Dinitronaphthalène	39	15	38,46%	0,29	635
1,8-Dinitronaphthalène	39	19	48,72%	0,21	6630
Somme des Dinitronaphtalènes	**39**	**19**	**48,72%**	**0,32**	**7030**
Somme des composés nitroaromatiques	**39**	**27**	**69,23%**	**0,07**	**12199,01**

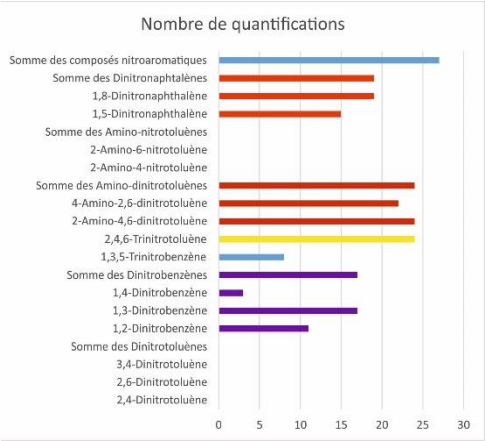


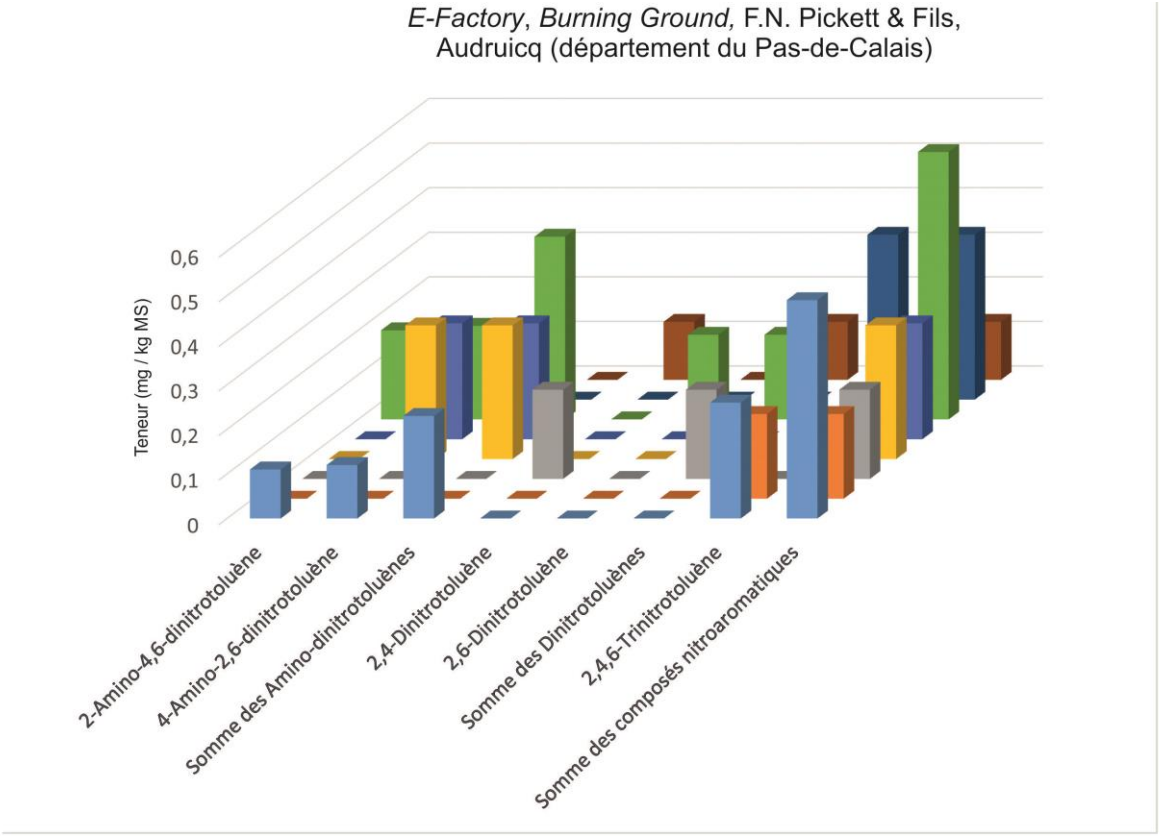
Tableau 55 : Nombre d'analyses des composés nitroaromatiques (laboratoire Dr Haas) des échantillons composites solides sur brut (extraction aux solvants) et fréquences de détection. Site de Zweedorf (Allemagne).

Commune	Site	Terrain de brûlage	∑ADNT	∑DNT	∑DNB	TNB	TNT	∑NA	∑MNN	∑DNN	∑TNN
Gremilly	"Place à gaz"	Terrain de brûlage central	0,97	<	<	<	0,39	<	<	0,11	<
		Dépôt nord	**1,16**	<	<	<	1	<	<	0,44	<
		Fosse nord-est	0,31	<	<	<	0,63	<	<	0,42	<
		Dépôts périphériques	<	<	<	<	<	<	<	**3,99**	**22,45**
Trélon	*C-Factory*	Parc Jeannette 1	0,05	<	0,06	<	0,18	<	<	**2,09**	**1,25**
		Parc Jeannette 2	0,16	<	0,29	<	<	0,13	<	**1,3**	0,33
Liessies		Bois l'Abbé, brûlage	0,48	<	0,07	<	<	<	<	0,09	<
		Bois l'Abbé, dépôt	0,22	0,79	**8,26**	**12,9**	0,85	**1,23**	<	**58,7**	0,92
Conteville	Conteville	Bois Brulé	**1,76**	0,21	0,86	0,09	**26,4**	<	<	**4**	0,72
Westroozebeke (Belgique)	*B-Factory*	Conterdreef	**2,1**	**1,31**	**8,58**	<	**2,36**	0,8	<	**25,69**	**4,74**
Audruicq	*E-Factory*	Ostove	0,79	0,29	<	<	0,37	<		<	<
Vaudoncourt	Noire Fontaine	Tranchées	**23,96**	0,97	**1,64**	**7,06**	**1 347**	0,22	0,24	**90,5**	**638,9**
		Puits de brûlage	0,75	<	0,74	<	**1,34**	<	<	**1,88**	0,08
Muzeray	Rampont	Terrain de brûlage sud	-								
		Tranchées	0,5	<	0,08	0,19	0,56	<	<	**1,34**	0,56
Zweedorf (Allemagne)	Zweedorf	Terrain de brûlage	**72,6**	<	**5 668**	**7,9**	**2 080**	-	-	**7 030**	-

Tableau 56 : Teneurs maximales mesurées (en mg.kg^{-1} MS) en composés nitroaromatiques par analyses d'échantillons solides composites après extraction aux solvants (laboratoire Envilytix GmbH, Dr Haas (Zweedorf)).

Commune	Site	Terrain de brûlage	∑ADNT	∑DNT	∑DNB	1,3,5-TNB	2,4,6-TNT	∑NA	∑MNN	∑DNN	∑TNN	∑ADNB	∑ANB	2,4,6-trinitrophénol	Acide 2,4,6-trinitrobenzoïque
Gremilly	"Place à gaz"	Dépôts périphériques	**1,7**	<	0,71	<	0,73	<	<	**4,94**	**76,67**	<	**36,16**	<	<
		Fosse nord-est	<	<	<	<	<	<	<	**1,79**	**19,93**	<	<	<	<
Vaudoncourt	Noire Fontaine	Tranchées	**<**	<	**2,94**	<	**4,62**	<	<	**16,11**	**1,26**	<	<	<	<
		Zone à *chunks* de TNT	**2 844**	**102,4**	**137**	<	**37 602**	<	<	**18,18**	**21,8**	**199,4**	<	**18,7**	**3,45**
		Terrain d'explosion	<	<	0,66	<	<	**27,59**	<	**6,15**	<	<	<	<	<
Muzeray	Rampont	Terrain de brûlage sud	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
		Usine et zone de *chunks* de TNT	**240,5**	**11,92**	<	<	**2 143**	<	<	**7,29**	**19,47**	**25,71**	<	**86,4**	**1,44**

Tableau 57 : Concentrations maximales mesurées (en µg.L^{-1}) en composés nitroaromatiques par analyse des échantillons solides composites après lixiviation à l'eau (laboratoire Envilytix GmbH).



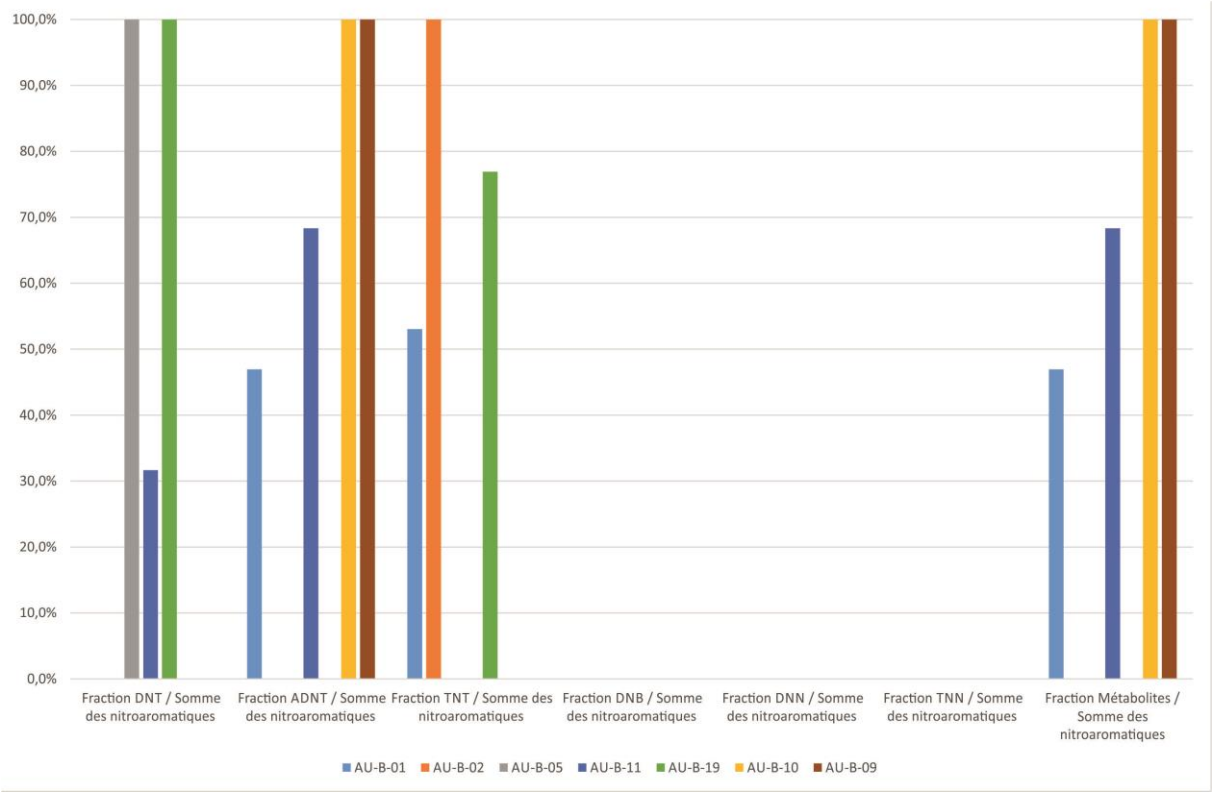
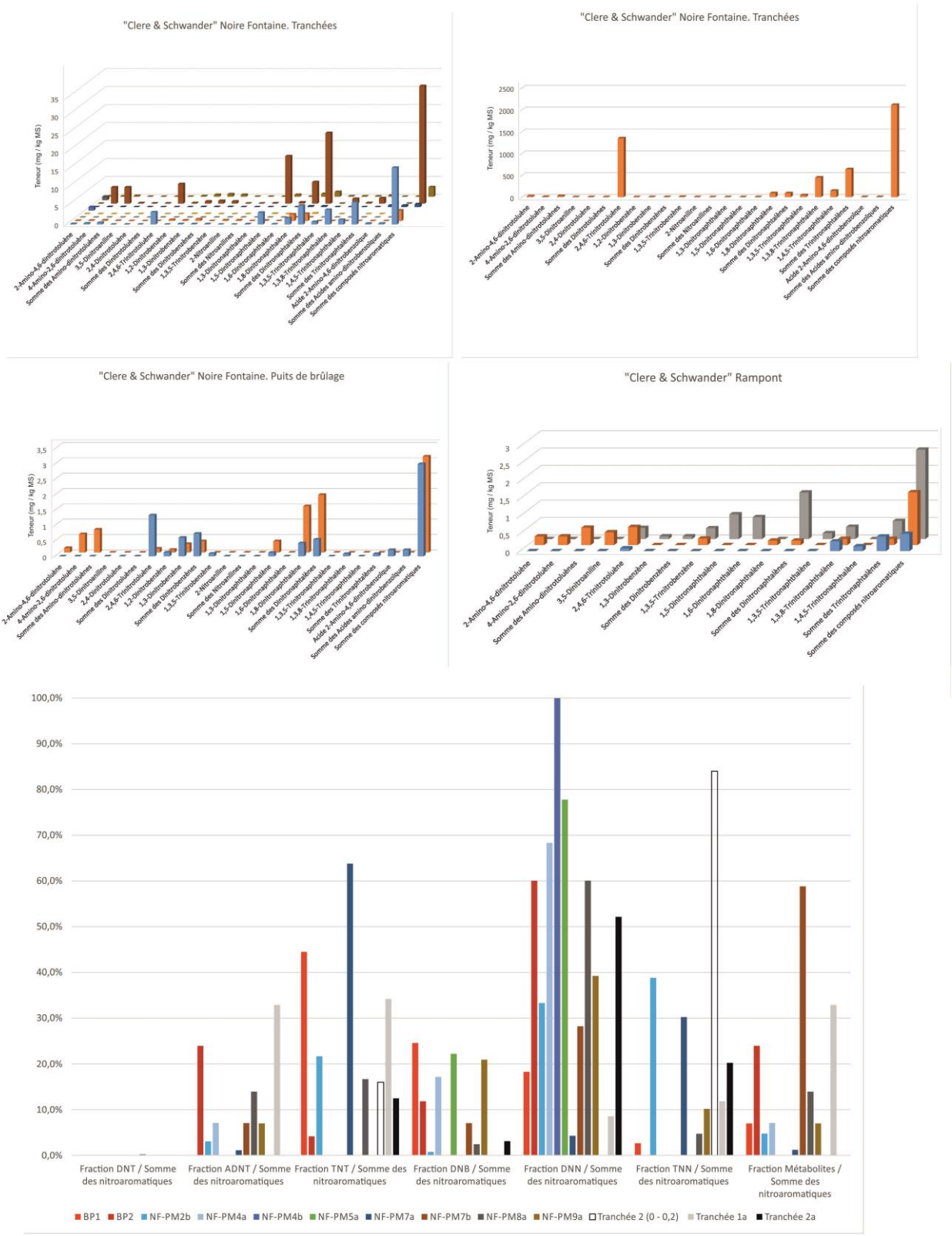


Figure 331 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols du terrain de brûlage de l'usine E-Factory de F.N. Pickett & Fils d'Audruicq (département du Pas-de-Calais).

Terrains de brûlage du complexe de désobusage Clere & Schwander
de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et Rampont (Muzeray) (département de la Meuse)



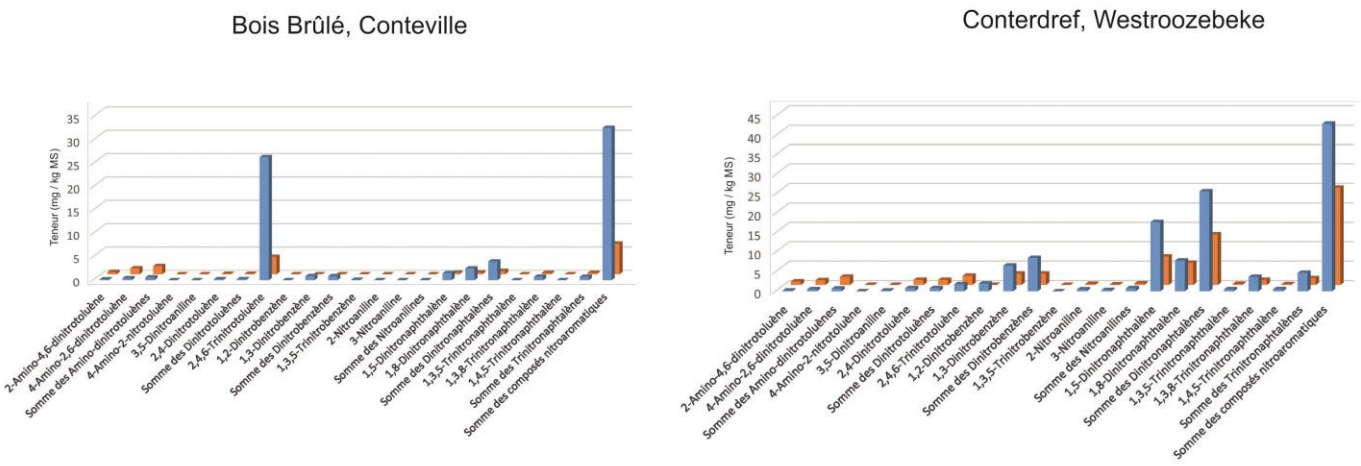
BP (puits de brûlage, Noire Fontaine), NF-PM (tranchées, Noire Fontraine), tranchée Rampont)

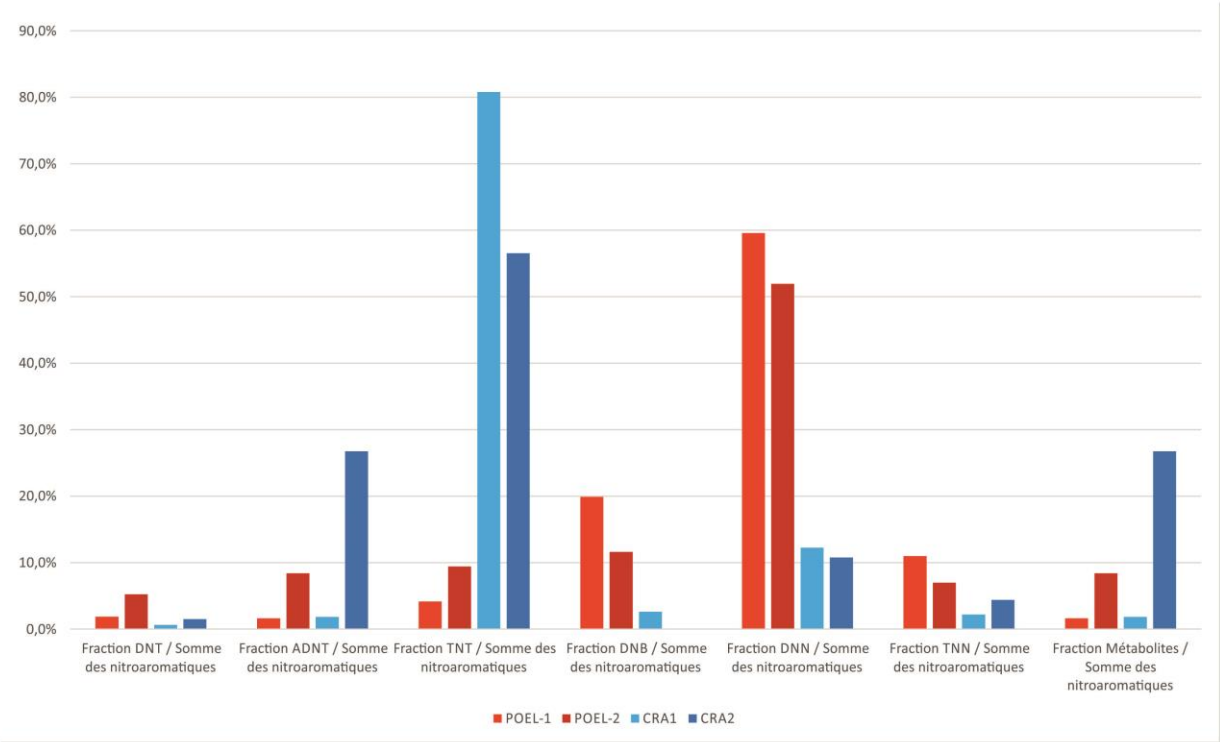
Figure 332 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage des sites de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt) et Rampont (commune de Muzeray) dans le canton de Spincourt (département de la Meuse).

« Place à gaz », *Burning Ground*, F.N. Pickett & Fils, Gremilly (département de la Meuse)

A7 bis (dépôts périphériques), TC1, 2, 5, SPM1 (tache centrale), SPM6 (fosse nord-est), D8 (dépôt nord)

Figure 333 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage du terrain de brûlage F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz », commune de Gremilly (département de la Meuse).



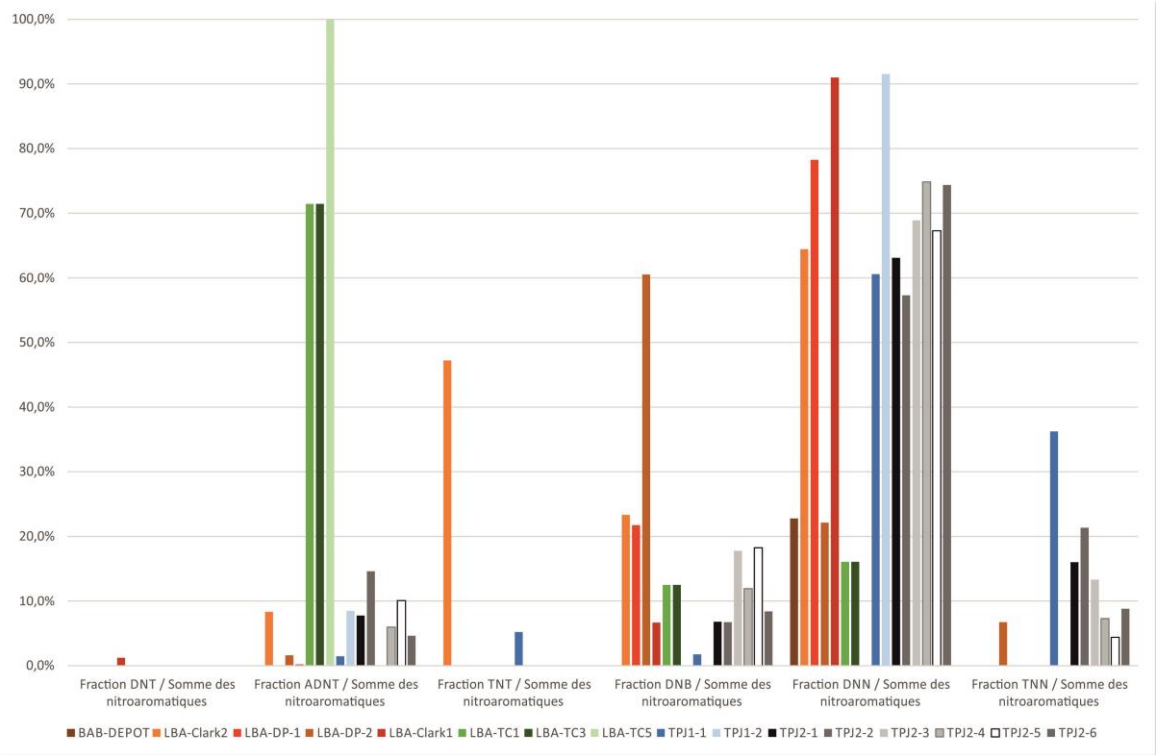


POEL: *B-Factory*, F.N. Pickett & Fils, Westroozebeke (Flandre occidentale, Belgique)

CRA: Bois Brûlé, F.N. Pickett & Fils (?) Conteville Domléger (département de la Somme)

Figure 334 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage des sites de désobusage F.N. Pickett & Fils de Westroozebeke (B-Factory, Belgique) et du Bois Brûlé de Conteville (département de la Somme).

C-Factory, F.N. Pickett & Fils
(Trélon (secteur sud) et Liessies (secteur nord)) (département du Nord)



Bois l 'Abbé, Liessies : BAB, LBA-Clark, LBA-DP (dépôts périphériques), LBA-TC (tache centrale)

Parc Jeannette, Trélon (*Burning Ground* 1): TPJ1

Parc Jeannette, Trélon (*Burning Ground* 2): TPJ2

Figure 335 : Distribution des teneurs en composés nitroaromatiques des sols et résidus de brûlage de site de désobusage F.N. Pickett & Fils de l'usine C-Factory de Trélon et Liessies (département du Nord).

4.3.4 Conclusion

Les résidus de brûlage sont caractérisés par de faibles teneurs en NAC comparativement aux ETM qui constituent l'essentiel de leur charge polluante. L'essentiel du chargement explosif se décomposa combustion lors des brûlages (sous forme d'espèces gazeuses CO_2, CO, N_2, H_2O, etc.), comme escompté. Lorsque ces composés nitrés aromatiques sont détectés, ils possèdent, pour la majorité des sites investigués, toujours la même signature (le même cortège de composés), à savoir une prédominance des di- et tri-nitronaphtalènes, du TNT et des isomères du DNB. Les ADNT (métabolite du TNT) caractérisent la signature chimique aux basses teneurs (< 10 $mg.kg^{-1}$ MS). Cette signature est mise en évidence par des extractions à l'eau (lixiviation) sur des échantillons composites, comme sur des extractions aux solvants sur des échantillons ponctuels, seules changent les teneurs obtenues par analyse des extraits. Il s'agit là, au regard des résultats des recherches historiques sur la composition des poudres et explosifs de la Grande Guerre (Section 1h du présent manuscrit) une association typique des explosifs allemands de la fin de la guerre et en particulier ceux ayant chargé des munitions chimiques, notamment celles arséniées à *Croix bleue*. Les terrains de brûlage investigués visèrent des munitions ex-allemandes de la fin de la guerre. L'empreinte chimique des résidus de brûlage, qu'il s'agisse de métaux ou de résidus de composés organiques reflètent la composition initiale des matériels détruits. Les empreintes chimiques en ETM et NAC d'autres terrains de brûlage, comme ceux de Conteville (brûlage d'allumeurs de grenades) ou encore d'Audruicq (possible brûlage d'explosifs britanniques) sont significativement différentes des *Burning Grounds* ayant neutralisés des projectiles d'artillerie ex-allemands. Ces distinctions pointent la question de la représentativité des caractérisations eu égard aux traces laissées par les opérations de brûlage, n'ayant eu possiblement accès qu'à un nombre limité de site très largement dominé par du déchargement de matériel ex-allemand.

4.4. TOXIQUES DE GUERRE ET DERIVES

4.4.1 Arsines et composés organo-arséniés. Synthèse des résultats analytiques

Les résultats analytiques sur lesquels se base le développement qui suit sont rassemblés en Annexe G du présent manuscrit.

Les composés organo-arséniés ont été recherchés dans les sols et les résidus de brûlage lorsque des indices de terrain, comme l'occurrence de teneurs élevées en arsenic total et/ou de tessons de fioles d'arsine furent mis en évidence. Ce fut le cas des sites de la « Place à gaz » à Gremilly, de la *C-Factory* de Trélon et Liessies, de la *B-Factory* de Westroozebeke et des installations de désobusage industriel Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt et de Rampont à Muzeray. Ont été recherchés dans les sols et les résidus provenant de ces sites de brûlage de munitions chimiques les chlorures (*Clark 1*, DA) et cyanures (*Clark 2*, DC) de diphénylarsine, l'acide diphénylarsinique (ADPA) provenant de l'oxydation des *Clark* 1 et 2, la triphénylarsine (TPA), et le 9-phénylfluorène (PAF), tous deux sous-produits de décomposition thermique partielle des arsines primaires (*Clark 1* et *2*). Les résultats et statistiques des analyses effectuées soit sur brut après extraction aux solvants, soit sur éluats après lixiviation d'échantillon d'un kilogramme (avec des ratios solide / liquide de 1) sont présentés dans le Tableau 58 (sur brut) et le Tableau 59 (sur éluat).

Commune	Site	Secteur	Nature	Chlorure de diphénylarsine (*Clark 1*) (DA)					Cyanure de diphénylarsine (*Clark 2*)(DC)					Acide diphénylarsinique (ADPA)					Triphénylarsine (TPA)					9-phénylfluorène (PAF)				
				Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)
Liessies	*C-Factory*. F.N. Pickett & Fils	Bois l'Abbé	Sédiments et zone de ruissellement	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	3	0	0,0%	<	<	3	0	0,0%	<	<	3	0	0,0%	<	<
Liessies	*C-Factory*. F.N. Pickett & Fils	Bois l'Abbé	Terrain de brûlage	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	4	0	0,0%	<	<	4	0	0,0%	<	<	4	0	0,0%	<	<
Liessies	***C-Factory*. F.N. Pickett & Fils**	**Bois l'Abbé**	**Dépôt à tessons**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	5	5	100,0%	**0,16**	**20,7**	5	2	40,0%	**25,8**	**81,4**	5	2	40,0%	**11,5**	**15,4**
Trélon	*C-Factory*. F.N. Pickett & Fils	Parc Jeannette	Terrain de brûlage 1	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	2	0	0,0%	<	<	2	0	0,0%	<	<	2	0	0,0%	<	<
Trélon	***C-Factory*. F.N. Pickett & Fils**	**Parc Jeannette**	**Terrain de brûlage 2**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	6	5	83,3%	**0,21**	**0,88**	6	1	16,7%	**0,79**	**0,79**	6	1	16,7%	**0,18**	**0,18**
Westroozebeke	***B-Factory*. F.N. Pickett & Fils**	**Conterdreef**	**Terrain de brûlage**	2	0	0,0%	<	<	2	0	0,0%	<	<	2	2	100,0%	**6,34**	**22,7**	2	2	100,0%	**2,89**	**88,5**	0	0	0,0%	-	-
Gremilly	**"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Terrain de brûlage central**	13	5	38,5%	**2,31**	**10,3**	0	0	0,0%	-	-	7	0	0,0%	<	<	13	3	23,1%	**0,16**	**15,7**	8	0	0,0%	<	<
Gremilly	"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils	Tranchée de la Gélinerie	Terrain de brûlage nord	1	0	0,0%	<	<	0	0	0,0%	-	-	1	0	0,0%	<	<	1	0	0,0%	<	<	1	0	0,0%	<	<
Gremilly	**"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Dépôts périphériques**	10	5	50,0%	**0,37**	**17**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	10	1	10,0%	**14**	**14**	0	0	0,0%	-	-
Gremilly	**"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Fosse nord-ouest**	5	0	0,0%	<	<	0	0	0,0%	-	-	5	1	20,0%	**17,5**	**17,5**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-
Vaudoncourt	**Clere & Schwander**	**Noire Fontaine**	**Sols de surface**	10	2	20,0%	**3,42**	**18,1**	10	0	0,0%	<	<	10	1	10,0%	**21,6**	**21,6**	10	9	90,0%	**0,14**	**14,8**	0	0	0,0%	-	-
Vaudoncourt	**Clere & Schwander**	**Noire Fontaine**	**Tranchées**	11	1	9,1%	0,5	0,5	11	0	0,0%	<	<	11	7	63,6%	**0,1**	**96,6**	11	5	45,5%	**0,12**	**1,83**	11	2	18,2%	**0,17**	**1,06**
Vaudoncourt	**Clere & Schwander**	**Noire Fontaine**	**Puits de brûlage**	2	1	50,0%	**1,13**	**1,13**	2	0	0,0%	<	<	2	0	0,0%	<	<	2	2	100,0%	**0,15**	**0,19**	2	0	0,0%	<	<
Muzeray	Clere & Schwander	Rampont	Sols usine	4	0	0,0%	-	-	4	0	0,0%	-	-	4	0	0,0%	-	-	4	0	0,0%	-	-	4	0	0,0%	-	-
Muzeray	Clere & Schwander	Rampont	Tranchées	5	0	0,0%	-	-	5	0	0,0%	-	-	5	0	0,0%	-	-	5	0	0,0%	-	-	5	0	0,0%	-	-

Tableau 58 : Résultats analytiques et statistiques des sols et résidus de brûlage visant les composés organo-arséniés sur brut et après extraction aux solvants (laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne).

Analyses sur lixiviat (mg/L)																												
Commune	Site	Secteur	Nature	Chlorure de diphénylarsine (*Clark 1*) (DA)					Cyanure de diphénylarsine (*Clark 2*)(DC)					Acide diphénylarsinique (ADPA)					Triphénylarsine (TPA)					9-phénylfluorène (PAF)				
				Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (µg/L)	Max (µg/L)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Nombre d'analyses	Nombre de détection	Taux de détection	Min (mg/L)	Max (mg/L)
Gremilly	**"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Terrain de brûlage central**	7	5	71,4%	**2,31**	**10,3**	1	0	0,0%	-	-	5	5	100,0%	**220**	**24721**	5	1	20,0%	**0,16**	**0,16**	5	1	20,0%	**0,6**	**0,6**
Gremilly	"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils	Tranchée de la Gélinerie	Terrain de brûlage nord	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-
Gremilly	**"Place à gaz" F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Dépôts périphériques**	12	6	50,0%	**0,47**	**17**	0	0	0,0%	-	-	12	1	8,3%	**10698**	**10698**	12	1	8,3%	**14**	**14**	12	1	8,3%	**1,64**	**1,64**
Gremilly	***C-Factory*, F.N. Pickett & Fils**	**Tranchée de la Gélinerie**	**Fosse nord-ouest**	1	1	100,0%	**11,8**	**11,8**	1	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	**-**	**-**	1	1	100,0%	**5,35**	**5,35**	1	1	100,0%	**0,76**	**0,76**
Vaudoncourt	**Clere & Schwander**	**Noire Fontaine**	**Sols de surface**	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**	11	10	90,9%	**18,2**	**2450**	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**
Vaudoncourt	**Clere & Schwander**	**Noire Fontaine**	**Tranchées**	11	1	9,1%	0,5	0,5	11	0	0,0%	<	<	11	7	63,6%	**0,1**	**96,6**	11	5	45,5%	**0,12**	**1,83**	11	2	18,2%	**0,17**	**1,06**
Vaudoncourt	Clere & Schwander	Noire Fontaine	Puits de brûlage	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**	0	0	0,0%	**-**	**-**
Muzeray	Clere & Schwander	**Rampont**	**Sols usine**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	2	2	100,0%	**6,16**	**28,7**	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-
Muzeray	Clere & Schwander	Rampont	Tranchées	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-	0	0	0,0%	-	-

Tableau 59 : Résultats analytiques et statistiques des sols et résidus de brûlage visant les composés organo-arséniés sur éluta après extraction par lixiviation à l'eau (laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne).

Tout comme pour les NAC, les résultats analytiques pour les composés organoarséniés s'avèrent hétérogènes du fait de l'évolution des approches d'extraction et des méthodes analytiques appliquées sur les échantillons entre les toutes premières mesures exploratoires sur le site de la « Place à gaz » de 2014 et celles des sites Clere & Schwander de 2018. Des choix sur des panels analytiques restreints et ciblés se sont aussi avérés nécessaires dans le processus de caractérisation des sites pollués par les armes chimiques à des fins d'évaluation des risques, à budget contraint.

Toutefois une tendance générale se dégage de ces résultats : les taux de détection les plus élevés coïncident avec les teneurs (sur brut) ou concentrations (sur éluat) les plus élevées et concernent les produits d'oxydation et/ou de décomposition thermique des phénylarsines, et plus précisément l'ADPA (acide diphénylarsinique) et le TPA (triphénylarsine). Les plus fortes teneurs en ADPA (jusqu'à 96 $mg.kg^{-1}$ MS) s'accompagnent en général de fortes teneurs en TPA (jusqu'à 88 $mg.kg^{-1}$ MS) et PAF (phénylarsine fluorène) (jusqu'à 15 $mg.kg^{-1}$ MS). Les plus fortes teneurs coïncident avec les échantillons de résidus de brûlage présentant de fortes densités de tesson de fioles d'arsine, bon indicateur de pollution par ces substances. Les concentrations sur éluat excèdent les 10 $mg.L^{-1}$ sur un échantillon de résidus noirâtre, gras, présentant des tessons fioles d'arsine à la « Place à gaz » alors que des teneurs de plus de 96 $mgADPA.kg^{-1}$ MS ont été mesurées dans les résidus d'une tranchée de brûlage interceptée par sondage à la pelle mécanique à Noire Fontaine. A Liessies (Bois l'Abbé) et à Westroozebeke, l'ADPA est aussi présente dans les cortèges organo-arséniés avec des teneurs proches de 20 $mgADPA.kg^{-1}$ MS au sein desquels prédomine la TPA (ponctuellement > 80 $mg.kg^{-1}$ MS). Ces résidus sont aussi ceux possédant les teneurs les plus élevées en As-HAP (jusqu'à 15,4 $mg.kg^{-1}$ MS au Bois l'Abbé).

Des traces de DA et DC sont toujours mesurées dans l'environnement (sols et résidus de brûlage) pouvant localement s'élever jusqu'à 18 mg $DA.kg^{-1}$ MS comme dans les résidus riches en tessons de fioles d'arsine de Noire Fontaine, à proximité du lieu de découverte d'une fiole brisée encore chargée d'arsines en grande partie oxydées. La DA est systématiquement détectée et quantifiée jusqu'à 10,3 $mg.kg^{-1}$ MS dans les résidus au droit du terrain de brûlage de la « Place à gaz ».

L'ADPA est un composé organo-arsénié polarisé, hydroxylé et de ce fait très hydrosoluble et bien plus soluble à l'eau que les autres espèces de la même famille (jusqu'à 2 000 $mg.L^{-1}$ pour les DA et DC)[1951] S'agissant de la forme organo-arséniée la plus mobile, c'est elle qui marque les analyses sur éluats, en concentrations comme en taux de détection. Ce composé a été majoritairement analysé dans le cadre de ces études comme étant un traceur rendant compte de la présence de pollutions organo-arséniées mobiles et donc potentiellement préjudiciables pour la qualité des eaux souterraines compte tenu de son caractère à la fois toxique et probablement cancérigène aux faibles doses d'exposition.

Globalement, comme pour les autres composés organiques (nitroaromatiques), les teneurs en résidus organo-arséniés sont faibles comparativement aux ETM, les arsines vomitives initialement présente dans les engins furent décomposées par l'action des températures élevées en H_2O, CO_2, HCl, arséniates et oxydes d'arsenic et un large panel de sous-produits d'oxydation et de recomposition moléculaire des radicaux réactifs produits lors de la combustion (comme les TPA et les hydrocarbures aromatiques polycycliques arséniés).

Les travaux de recherche mené par Bausinger et Preuss (2007)[1952] mirent en évidence la très grande diversité des composés organo-arséniés présents dans ces résidus de brûlage, appartenant pour nombre d'entre eux à la famille des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques Arséniés (HAP-As) et à des molécules complexes de haut poids moléculaires triphénylés et terphénylés, pour certains d'entre eux oxydés et possédant un seul atome d'arsenic (cf. Figure 336).

[1951] J. Plantamura, A. Bousquet, E. Valéro, P. Vest, C. Renard (2011). *Les arsines vomitives : toxiques chimiques toujours d'actualité ? Médecine et armées,* 2011, 39, 5, 453-457

[1952] Bausinger, T., Preuss, J. (2011). *Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunition im Wald von Spincourt (Frankreich). op, cit.*

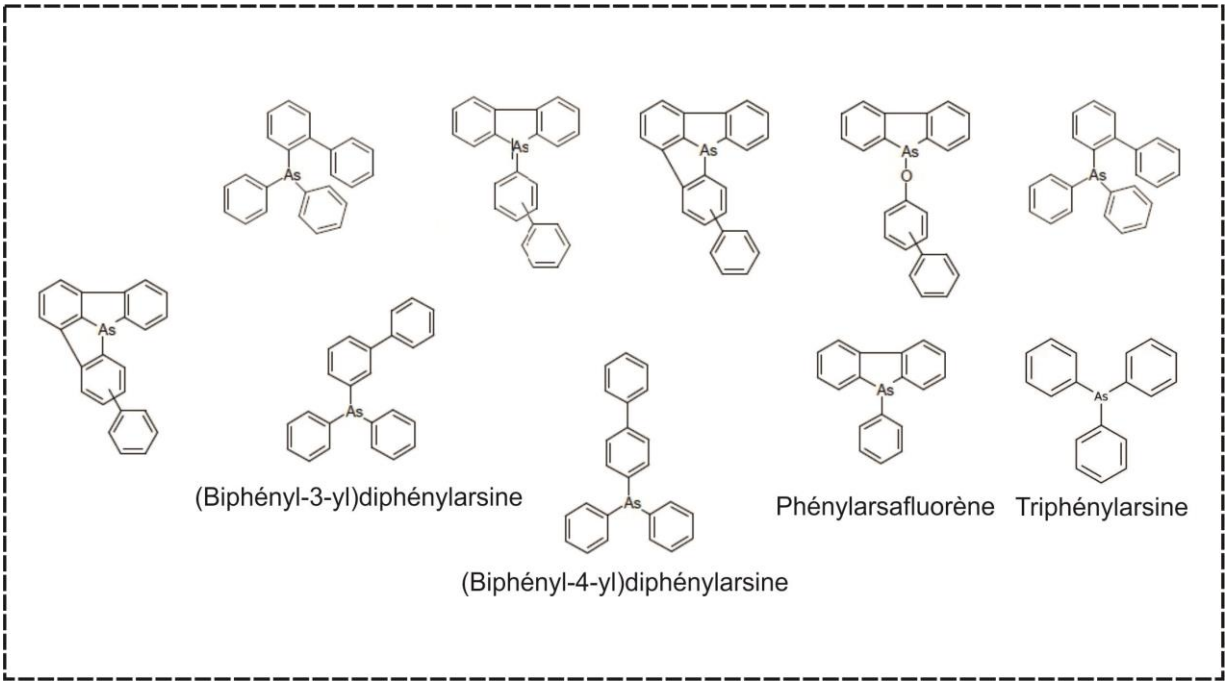


Figure 336 : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques arséniés et composés arséniés phénylés produits par la décomposition thermique des chlorures et cyanures de diphénylarsines[1953].

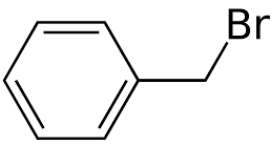
4.4.2 Brome lixiviable, composés organo-bromés et organo-iodés

Le brome et l'iode total lixiviables ont été recherchés en 2014 dans les échantillons composites de sol de surface et de résidus de brûlage au droit et aux abords du terrain de brûlage de la « Place à gaz ». Les résidus comblant la fosse nord-est (sondage SPM6) ont aussi été échantillonnés pour l'analyse du brome lixiviable (cf. Tableau 60). Des concentrations élevées et nettement anomaliques en brome lixiviables (jusqu'à 57 $mg.L^{-1}$) ont été mesurées dans ces résidus. L'iode n'a été détectée qu'à l'état de traces dans les sols de surface (concentration maximale de 73,2 $\mu g.L^{-1}$).

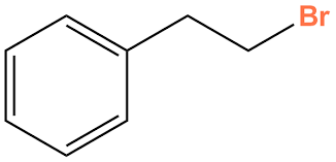
Consécutivement à ces résultats, un *screening* de recherche systématique des liaisons organiques par CPG / MS a été réalisé sur un échantillon de résidus (SPIN1) provenant de la fosse par le laboratoire Envilytix GmbH. Ce *screening* révéla l'occurrence dans ces résidus de nombreux composés mono-aromatiques bromés ou dibromés et méthylés et de tribromométhane. Certains composés organo-bromés et organo-iodés réputés entrer dans la composition de certains toxiques de guerre (comme les bromures de benzyle et de xylyle (cf. Figure 337), l'iodacétone (cf. Figure 57) ont été recherchés pour une quantification au laboratoire (Envilytix GmbH) sur des échantillons de sols (abords du terrain de brûlage) et de résidus de brûlage (au droit de la clairière, tâche centrale) de la « Place à gaz ». Des traces (< 0,6 $mg.kg^{-1}$ MS) d'isomères de bromo-toluènes, de bromo- et dibromo-xylènes ont été identifiées dans deux échantillons de résidus de brûlage de la « Place à gaz ». Ces composés n'ont pas été recherchés dans les résidus de brûlage de la fosse nord-est. Ils n'ont pas été recherchés dans les résidus des autres sites de brûlage visés par la présente recherche.

Aucun composé iodé (iodacétate, éthyliodoacétate) n'a été quantifié à des teneurs supérieures à la Limite de Quantification (LQ) appliquée par le laboratoire (0,1 $mg.kg^{-1}$ MS) lorsque ces composés ont été recherchés (site de la « Place à gaz ») (cf. Tableau 61).

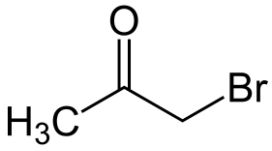
[1953] Bausinger, T., Preuss, J. (2011). *Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunition im Wald von Spincourt (Frankreich), op, cit.*



Bromure de benzyle ou bromotoluène (CAS : 100-39-0)



Bromure de xylyle ou (2-bromoéthyl)benzène (CAS : 103-63-9)



Bromécétone ou bromure d'acétonyle (CAS : 598-31-2)

Figure 337 : Formules structurales des bromures de benzyle et de xylyle et de la bromacétone.

Terrain de brûlage de la "Place à gaz" à Gremilly (Meuse)							
Sondage / échantillon	Date d'échantillonnage	Localisation	Méthode (BRGM)	Profondeur (m / sol)	Br lixiviable (µg/kg)	iodure lixiviable (µg/kg)	Unité
Limite de quantification (LQ)	-	-	-	-	1	0,5	µg/kg
SPM06-0,2	oct-14	Fosse de brûlage		0,2	**57000**	**-**	µg/kg
SPM06-0,6	oct-14	Fosse de brûlage		0,6	**4600**	**-**	µg/kg
SPM06-1,8	oct-14	Fosse de brûlage		1,8	**3800**	**-**	µg/kg
SPM06-2,8	oct-14	Fosse de brûlage		2,8	**5200**	**-**	µg/kg
SPM06-3,6	oct-14	Fosse de brûlage		3,6	**6800**	**-**	µg/kg
SPIN-01-EL	avr-14	Fosse de brûlage		surface	**9960**	1,13	µg/kg
SPIN-02-EL	avr-14	Tache centrale		surface	31,9	1,84	µg/kg
SPIN-03-EL	avr-14	Tache centrale		surface	75,3	6,78	µg/kg
SPIN-04-EL	avr-14	Périphérie		surface	132	**73,2**	µg/kg
SPIN-05-EL	avr-14	Périphérie		surface	51,2	6,32	µg/kg

Tableau 60 : Résultats analytiques du brome et de l'iode lixiviables sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Grémilly). département de la Meuse (BRGM).

Composé / paramètre	Méthode (Envilytix GmBH)	Unité	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	A3	A7 bis	A11	A13	A18	B5	C1 bis	C4 bis	C9bis	C14 bis
2-Bromotoluène	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	**0,1**	**0,4**	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4-Bromotoluène	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	**0,1**	**0,4**	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2-Bromo-p-xylène	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	**0,2**	**0,6**	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2,5-Dibromo-p-xylène	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	**0,1**	**0,2**	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bromure de benzyle (K-stoff")	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ethyliodoacétate	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Iodacétone	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tableau 61 : Résultats analytiques des dérivés organo-bromés et organo-iodés sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Envilytix GmbH).

Le tétrabromoéthane, identifié par un *screening* CPG / MS dans des échantillons provenant des sols de surface de l'usine Clere & Schwander de Rampont à Muzeray et des installations de désobusage de Noire Fontaine à Vaudoncourt, a été recherché par analyses quantitatives sur des échantillons de sols et de résidus marqués par les toxiques de guerre et explosifs provenant de Noire Fontaine. Ce composé n'a pas été détecté (pour une limite de quantification de 0,05 $mg.kg^{-1}$ MS) (cf. Tableau 62).

Libélé	Localisation	Nature du site	Date d'échantillonnage	Méthode (Envilytix GmBH)	Unité	Tétrabromoéthane
NF-AT-1	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-2	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-3	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-4	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-5	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-6	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-7	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-8	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-9	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-AT-10	Noire Fontaine, Vaudoncourt	Atelier de destruction de munitions	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-PROJ-1	Noire Fontaine, Vaudoncourt (terrain d'explosion)	Terrain d'explosion	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-PROJ-2		Terrain d'explosion	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-EXP-1 Tannen		Terrain d'explosion	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05
NF-EXP-2		Terrain d'explosion	juil-16	interne	mg/kg MS	<0,05

Tableau 62 : Résultats analytiques du tétrabromoéthane sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage du site de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt). département de la Meuse (Envilytix GmbH).

Enfin, les PolyBromoDibenzoDioxines (PBDD) et PolyBromoDibenzoFuranes (PBDF) (cf. Figure 338) ont été analysés sur trois échantillons composites issus de la « Place à gaz » : un échantillon des résidus de la fosse nord-est, un échantillon de sédiments du ruisseau drainant la « Place à gaz » et un échantillon de résidus collectés au droit de la zone de brûlage nord (cf. Tableau 63). Les échantillons de résidus de brûlage de la fosse et de la zone nord s'avèrent très marqués en dioxines bromées (jusqu'à 19 696 ng/kg MS dans la fosse) mais surtout en furannes bromées (jusqu'à 62 335 ng/kg MS dans la fosse) avec une signature chimique nettement dominée par les congénères hexa- et hepta-bromés (∑HxBDF + HpBDF = 57 160 ng/kg MS, soit 91% des PBDF). Les dioxines bromées sont surtout marquées par les congénères octa- et hexa-bromées ((∑HxBDD + OBDD = 18 385 ng/kg MS, soit 93% des PBDD).

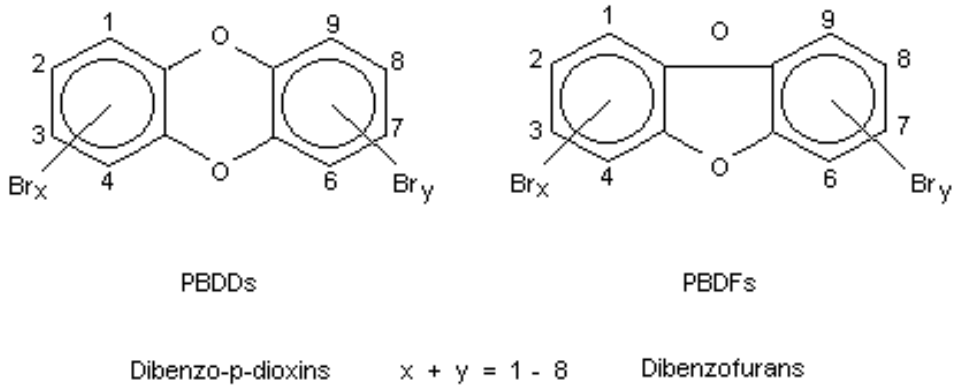


Figure 338 : Formules structurales des PolyBromoDibenzo-Dioxines (PBDD) et des PolyBromoDibenzo-Furanes (PBDF)[1954].

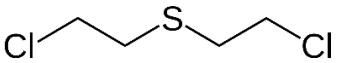
[1954] Peter & Salehi, Shahrbanoo. (2013). *Human exposure to Brominated dibenzo p-dioxin*. Umeå University Human exposure to brominated dibenzo-p-dioxins through ingestion of marine food supplements.

Famille	Congénère	Laboratoire DIOXLAB	Unité	D8 (28/01/2015)	CONF-01 (28/01/2015)	FOS-01 (28/01/2015)
				Aire de brûlage Nord	Sédiment aval D8	Fosse de brûlage
PolyBromoDibenzoDioxines	2,3,7,8 TBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	17,8	743,42	184,57
	1,2,3,7,8 PeBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	99,46	1591,21	773,44
	1,2,3,4,7,8-HxBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	1301,23	2218,8	4586,22
	1,2,3,6,7,8 HxBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	1301,23	2218,8	4586,22
	1,2,3,7,8,9-HxBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	1655,73	766,11	2784,9
	1,2,3,4,6,7,8 HpBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	55,21	703,33	352,96
	Octa BDD	CPG/MS	ng/Kg MS	13688,01	1097,35	6428,57
	Somme des TBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	17,8	743,42	184,57
	Somme des PeBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	99,46	1591,21	773,44
	Somme des HxBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	4258,19	5203,71	11957,34
	Somme des HpBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	55,21	703,33	352,96
	Somme des OBDD	CPG/MS	ng/Kg MS	13688,01	1097,35	6428,57
	Somme des PBDD	**-**	**ng/Kg MS**	**18118,67**	**9339,02**	**19696,88**
PolyBromoDibenzoFurannes	2,3,7,8 TBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	153,43	1125,33	662,75
	1,2,3,7,8 PeBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	304,34	2405,04	1716,72
	2,3,4,7,8 PeBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	313,7	2707,15	2535,6
	1,2,3,4,7,8-HxBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	3023,71	2704,87	24415,68
	1,2,3,6,7,8 HxBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	<9,3	<5,6	<2,2
	1,2,3,7,8,9-HxBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	<10,10	<5,6	<2,2
	1,2,3,7,8,9-HxBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	<24,3	<5,6	<2,2
	1,2,3,4,6,7,8 HpBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	4393,4	1023,91	32744,37
	1,2,3,4,7,8,9 HpBDF	CPG/MS	ng/Kg MS	<11,8	<10,3	<1,18
	Octa BDF	CPG/MS	ng/Kg MS	22997,64	2019	260,16
	Somme des TBDF	-	ng/Kg MS	153,43	1125,33	662,75
	Somme des PeBDF	-	ng/Kg MS	618,04	5112,19	4252,32
	Somme des HxBDF	-	ng/Kg MS	3023,71	2704,87	24415,68
	Somme des HpBDF	-	ng/Kg MS	4393,4	1023,91	32744,37
	Somme des OBDF	-	ng/Kg MS	22997,64	2019	260,16
	Somme des PBDF	**-**	**ng/Kg MS**	**31186,22**	**11985,3**	**62335,28**
	Somme des PBDD & PBDF	**-**	**ng/Kg MS**	**49304,89**	**21324,32**	**82032,16**

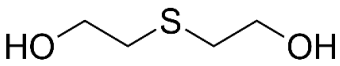
Tableau 63 : Résultats analytiques des PolyBromoDibenzoDioxines (PBDD) et PolyBromoDibenzoFuranes (PBDF) sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » (Grémilly). département de la Meuse (Dioxlab).

4.4.3 Composés soufrés et organochlorés dérivés de l' *Ypérite* (sulfure d'éthyl dichloré, HD)

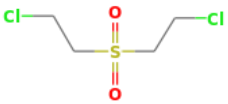
Les résultats analytiques sur lesquels se base le développement qui suit sont rassemblés en Annexe G du présent manuscrit. Les composés sulfurés (sulfones, sulfures et sulfoxydes) (cf. Figure 339) dérivés de l'évolution environnementale et/ou de la neutralisation chimique de l'*Ypérite* au soufre distillée (sulfure d'éthyl dichloré, HD) par hydrolyse et oxydation (Munro, 1999[1955]) ont été recherchés sur 20 échantillons de sol composites collectés au droit et aux abords du terrain de brûlage de la « Place à gaz ». Ces composés n'ont pas été détectés (cf. Tableau 64).



Bis(2-chloroethyl)sulfure ou Ypérite



Thiodiglycol, ou bis(2-hydroxyethyl)sulfure



Bis(2-chloroethyl) sulfone

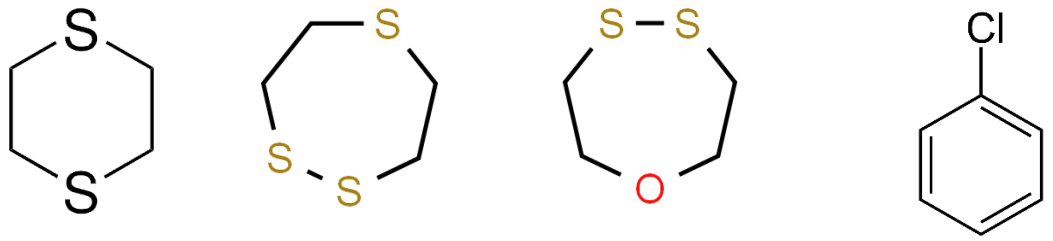
Figure 339 : Formules structurales de l'Ypérite au soufre, du thiodiglycol et de la Bis(2-chloroethyl) sulfone.

[1955] Munro, N.B., Talmage, S.S., Griffin, G.D., Waters, L.C., Watson, A.P., King, J.F., Hauschild, V. (1999). *The Sources, Fate, and Toxicity of Chemical Warfare Agent Degradation Products. Environmental Health Perspectives*, *op.cit.*

Paramètre / composé	Nature	Méthode (Envilytix GmbH)	Unité	Nombre d'analyses	Nombre de détections	Min (mg/kg MS)	Max (mg/kg MS)
Bis(2-hydroxyethyl) sulfure	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
Bis(2-hydroxyethyl) sulfone	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
Acide 2,2´-Thiodiacetique	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
Bis(2-chloroethyl) sulfure	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
Bis(2-chloroethyl) sulfone	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
Bis(2-chloroethyl) sulfoxyde	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	20 ("Place à Gaz")	0	<	<
1,4-Dithiane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	56	1	**1,21**	**1,21**
1,2,5-trithiépane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW 2017	mg/kg MS	41	3	**0,09**	**0,41**
1,4-Oxathiane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	56	0	<	<
1-oxa-4,5-dithiépane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW 2017	mg/kg MS	41	3	**0,28**	**0,41**
Monochlorobenzène	Solvant des ypérites allemandes	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	52	15	**0,04**	**20,1**

Tableau 64 : Résultats analytiques des dérivés et impuretés de l'ypérite soufrée sur les échantillons composites de sol et résidus de brûlage de la « Place à gaz » et des sites Clere & Schwander de Rampont (Muzeray) et Noire Fontaine (Vaudoncourt) (Envilytix GmbH).

Les analyses chimiques révèlent par contre la présence de traces de monochlorobenzène (MCB) et de thianes dans les résidus de brûlage formant le sol de la tache centrale de la « Place à gaz » et à Noire Fontaine. Le MCB était le solvant et le fluidisant des *Ypérites* au soufre allemandes des obus à *Croix jaune*, un toxique de guerre vésicant caractérisé par son odeur alliacée liée à la présence dans le toxique de thianes (composés soufrés cycliques). Les thianes sont des impuretés de l'*Ypérite* au soufre mais qui peuvent aussi se néoformer lors de la décomposition thermique de l'*Ypérite* au soufre (par cyclisation) lors des brûlages[1956]. Ont été détectés ponctuellement la 1,4-dithiane (à hauteur de 1,21 mg.kg^{-1} MS), la 1,2,5-trithiépane (jusqu'à 0,41 mg.kg^{-1} MS) et la 1-oxa-4,5-dithiépane (jusqu'à 0,41 mg.kg^{-1} MS) (cf. Figure 340). Le MCB a été détecté dans 15 échantillons sur les 52 analysés, à des teneurs parfois significatives s'élevant jusqu'à 20,1 mg.kg^{-1} MS (avec des teneurs maximales de 4,54 mg/kg MS au droit de la « Place à gaz », 12,8 mg.kg^{-1} MS dans les résidus du puits de brûlage de Noire Fontaine, 20,1 mg.kg^{-1} MS au sein des résidus d'une tranchée de brûlage de Noire Fontaine). MCB et thianes appartiennent aux cortèges de molécules persistantes présentes dans les *Ypérites* au soufre.



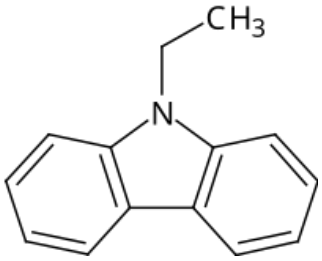
1,4-dithiane *1,3,5-trithiépane* *1-oxa-4,5-dithiépane* *Monochlorobenzène*

Figure 340 : Formules structurales des principaux thianes identifiés et du monochlorobenzène.

[1956] Munro, N.B., Talmage, S.S., Griffin, G.D., Waters, L.C., Watson, A.P., King, J.F., Hauschild, V. (1999). *The Sources, Fate, and Toxicity of Chemical Warfare Agent Degradation Products. Environmental Health Perspectives, op.cit.*

4.4.4 Autres toxiques de guerre

Le N-éthylcarbazole (de formule $C_{14}H_{13}N$, cf. Figure 341) a été identifié en 2015 par *screening* de recherche systématique des liaisons organiques sur des échantillons provenant du site de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine en juillet 2016. Ces échantillons provenaient d'une zone d'extension limitée (quelques dizaines de m^2) dont les sols présentaient la particularité d'être très riches en éléments millimétriques et centimétriques (*chunk*) d'explosifs.



Cette molécule a ensuite été recherchée dans 36 échantillons composites provenant des sites Clere & Schwander de Noire Fontaine et de Rampont. Cette molécule a été détectée dans trois échantillons à l'état de traces (0,39, 0,51 et 3,32 $mg.kg^{-1}$ MS) (avec une Limite de Quantification à 0,05 $mg.kg^{-1}$ MS). Le N-éthylcarbazole était un agent toxique irritant allemand apparu tardivement, en 1918, sur les champs de bataille.

Figure 341 : Structure chimique du N-Ethylcarbazole:

4.4.5 BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et isomères du xylène) et HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)

Les résultats analytiques portant sur les HAP et les BTEX sont placés en Annexe G du présent manuscrit.

Les 16 HAP de la liste standard de l'US EPA ont été recherchés sur des échantillons de sol et de résidus de brûlage composites constitués lors des diagnostics exploratoires (recherche des cortèges en présence afin d'orienter les cartographies des principaux polluants en présence) sur les terrains et dépôts de résidus de brûlage de la « Place à gaz » (en 2014), au droit des systèmes de tranchées des installations Clere & Schwander de Noire Fontaine (en 2015), et plus ponctuellement au niveau de l'usine Clere & Schwander de Rampont (en 2015). Les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, o-, m-, p-Xylènes) ont été recherchés sur trois échantillons composites de résidus de brûlage de la « Place à gaz » (avril 2014). Cette liste a été étendue aux isomères du triméthylbenzène : pseudocumène (1,2,4-triméthylbenzène), mésitylène (1,3,5-triméthylbenzène) et hémillitène (1,2,3-Triméthylbènzene). Le benzène n'a pas été recherché par le laboratoire. Les teneurs en HAP n'excèdent pas 15 $mg.kg^{-1}$ MS (∑HAP US EPA) et 7 $mg.kg^{-1}$ MS (∑HAP US EPA) respectivement à Noire Fontaine et à Rampont. Les teneurs les plus élevées ont été relevées dans un échantillon de sol de l'environnement forestier de la « Place à gaz » avec 90 $mg.kg^{-1}$ MS (∑HAP US EPA). Les molécules prédominantes sont celles à plus de trois cycles benzéniques.

Concernant les BTEX et triméthylbenzènes, dans les trois échantillons de résidus de brûlage analysés, seules des traces (< 1 $mg.kg^{-1}$ MS) ont été détectées et de surcroît dans un seul échantillon (provenant de la fosse nord-est où par ailleurs la présence de composés bromés mono-aromatiques a été identifiées).

La recherches de ces composés dans les résidus de brûlage et les sols n'a pas été poursuivies lors des diagnostics approfondis car ces HAP, comme les BTEX et triméthylbenzènes, n'apparaissaient pas comme des polluants majeurs des sites de brûlage étudiés, comparativement à d'autres composés dont les fréquences, les teneurs et toxicités s'avérèrent bien plus élevées.

5. Polluants des sols et des résidus de brûlage. Géoindicateurs des Restes Explosifs de Guerre et des pratiques de brûlage

5.1. INTRODUCTION

Les cortèges d'Eléments Traces Métalliques (ETM) et de substances nitrées organiques identifiés dans les sols et les résidus déposés au droit et dans le proche environnement des terrains de brûlage (*Burning Grounds*) résultent d'opérations de neutralisation de munitions conventionnelles et chimiques et de matières explosibles et agressives effectuées sur des tonnages importants dans l'entre-deux-guerres. Ces associations d'ETM et de substances découlent, comme cela est explicité dans ce qui suit, (i) de la nature et de la composition des matériels brûlés et (ii) des pratiques et des conditions opératoires des brûlages.

5.2. FINGERPRINT DES RESIDUS ISSUS D'OPERATIONS DE DECHARGEMENT PAR BRULAGE DE PROJECTILES ARSENIES A *CROIX BLEUE*

5.2.1 Indicateurs physiques et chimiques de destruction par OD de projectiles à chargements arséniés

La présence concomitante dans les sols et les dépôts accessibles à la surface des terrains pollués de la « Place à gaz » (Gremilly), du Parc Jeannette (terrain de brûlage 2 de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Trélon), de Conterdreef (*B-Factory* de F.N. Pickett & Fils de Westroozebeke), des usines du complexe de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et Rampont (Muzeray), de (i) teneurs exceptionnelles en arsenic total pouvant excéder les 100 $gAs.kg^{-1}$ MS (soit 10%), (ii) de sous-produits ne pouvant être que générés par l'oxydation des chlorures (*Clark 1*) et/ou cyanures (*Clark 2*) de diphénylarsines (notamment l'acide diphénylarsinique et les triphénylarsines) et (iii) de fioles en verre vert ou de tessons de fioles ayant appartenu à des projectiles arséniés de différents calibres, ne laissent aucun doute sur la nature des engins de guerre qui ont été détruits historiquement par voies industrielles sur ces terrains.

Il s'agit de projectiles dits à *Croix bleue*, ex-allemands, chargés en arsines vomitives. Seule l'Artillerie allemande disposait, à compter du second semestre 1917, de tels projectiles chimiques à chargement arsénié solide. Il s'agissait des projectiles de calibre 77 (cf. Figure 342 ci-contre), 105, 150 et 210 mm. Les fioles d'arsines *Clark* 1 et 2 étaient noyées dans un explosif fondu, goulot vers le bas, et obturées par des bouchons en verre vert ou encore en porcelaine blanche. A noter que parmi ces bouchons récoltés ou observés par centaines sur le terrain, un seul s'avéra être constitué d'un verre bleu d'une très grande pureté (cf. Figure 344). Ces fioles et bouchons étaient faits main par des verriers. Fallait-il voir une intention du verrier de créer un objet insolite, beau et imprimer sa marque de fabrique ? On rappelle que l'obus à *Croix bleue* de 210 mm était le plus gros projectile chimique de la Première Guerre mondiale. Son chargement d'arsine n'était pas contenu dans des fioles en verre mais dans un réservoir en tôle cannelée.

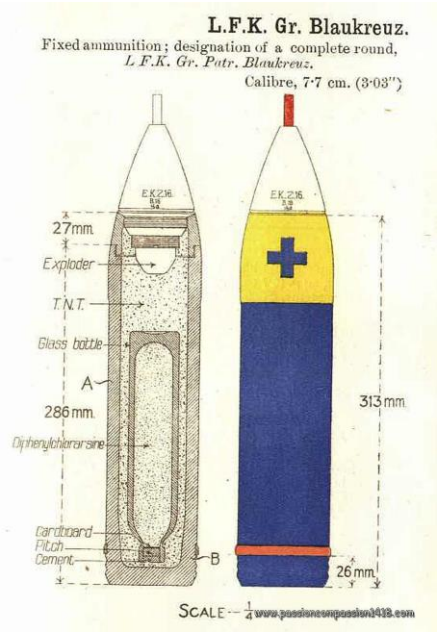


Figure 342 : Obus chimique allemand à Croix bleue de calibre 77 mm long chargé de chlorure de diphénylarsine.

Les fioles découvertes intactes à la « Place à gaz », à Trélon ou encore à Noire Fontaine appartiennent majoritairement aux obus allemands à *Croix bleue* de 77 mm allongé pour canon de campagne (d'un poids total de 6,88 kg, pour un poids d'explosif de 0,620 kg, les fioles de 19 cm de haut renfermant 0,135 kg majoritairement du *Clark 1* (chlorure de diphénylarsine noirâtre))[1957]. A la « Place à gaz » des éléments de corps d'obus de projectiles allemands de 105 mm allongé pour obusier et des tessons ayant appartenu à des engins de calibre supérieur à 77 mm, ont aussi été découverts (cf. Figure 106). A Westroozebeke, (*B-Factory* de F.N. Pickett & Fils) une seule fiole d'arsine, vide, d'obus de 77 mm court a été découverte. A Liessies, les résidus allochtones déposés à proximité du terrain du Bois l'Abbé renfermaient des tessons ayant appartenu à des engins de 77, 105 et 150 mm à *Croix bleue*.

[1957] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 2e Bureau et Artillerie. *Artillerie Allemande. Les projectiles*. Paris. 1917.

Figure 343 : Bouchons unique en verre et porcelaine de fiole d'obus à Croix bleue. A gauche, deux fioles d'obus de 77 mm long. Celle de gauche est partiellement fondue à sa base. Site de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse)[1958].

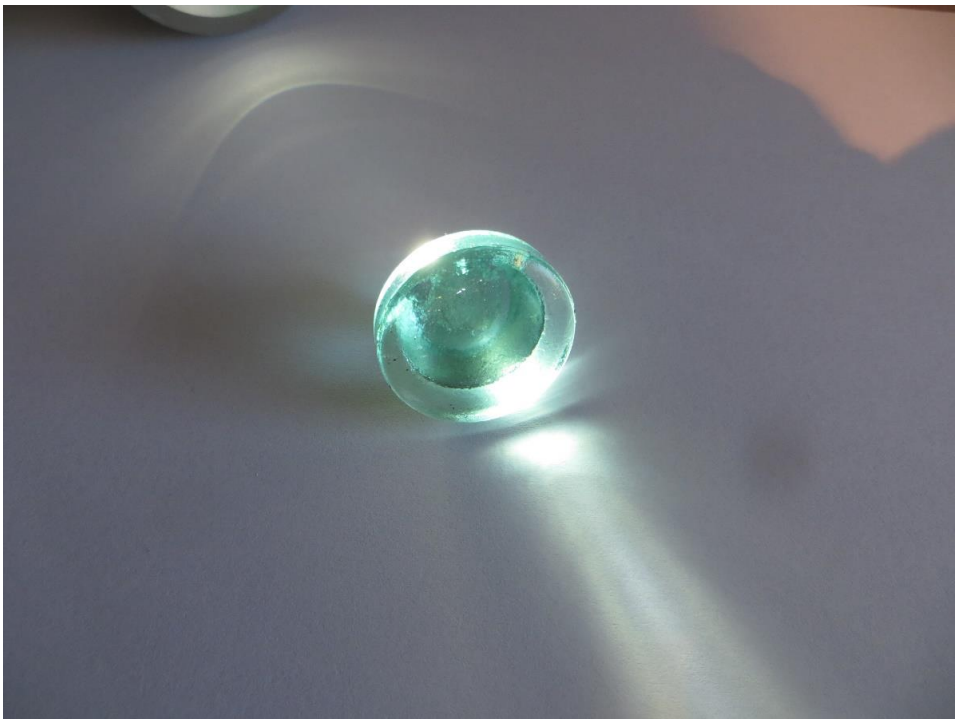


Figure 344: Bouchon unique en verre transparent bleu d'une fiole d'obus à Croix bleue de 77 mm. Site de la « Place à gaz »[1959].

[1958] Hubé, D. (2014).

[1959] *Ibid.*

Des obus à *Croix bleue* appartenant à différents calibres ont donc été éliminés sur ou à proximité de ces terrains. La découverte sur les différents sites de brûlage (i) de fioles d'arsine vidées mais intactes côtoyant des fioles partiellement fondues (et déformées par ramollissement du verre), et de billes et galettes de verre vert totalement fondues (cf. Figure 345), (ii) de résidus calcinés et d'éléments charbonneux, et (iii) de terrains naturels rouge et oxydés (rubéfiés) au contact des résidus, sont des indices de processus de combustion des obus à *Croix bleue*, jusqu'à des températures excédant celles de la fusion du verre (> 1 500°C).

Figure 345 : Indicateurs physiques d'opérations de brûlage. a) Fiole d'arsine en verre vert d'obus à Croix bleue de 77 mm long déformée et partiellement fondue (site de la « Place à gaz »), b) élément pluri centimétrique de charbon de bois (site de la B-Factory à Westroozebeke), c) galette de verre vert totalement fondu (site de la B-Factory à Westroozebeke).

Les analyses chimiques approfondies réalisées sur des échantillons provenant de différents sites de destruction de munitions en France et en Belgique montrent que les teneurs extrêmes en arsenic inorganique, présent dans les résidus sous forme de phases minérales amorphes ou cristallines néoformées, essentiellement des arséniates (AsO_4^{3-}) de fer, de cuivre, de zinc, sont localement associées à des formes organo-arséniées typiquement issues de la décomposition thermique partielle des cyanures (*Clark 2*) et chlorures (*Clark 1*) de diphénylarsines, parmi lesquelles la triphénylarsine (TPF), le 9-phénylfluorène (PAF) et la (biphényl-4-yl)diphénylarsine. L'acide diphénylarsinique (ADPA) provient quant à lui de l'oxydation abiotique des diphénylarsines ayant initialement chargé les engins à *Croix bleue*.

Comme exposés précédemment avec les résultats analytiques des résidus organo-arséniés, les travaux de recherche de Bausinger et Preuss (2007)[1960] mirent en évidence la très grande diversité des composés organo-arséniés présents dans ces résidus de brûlage, appartenant pour nombre d'entre eux à la famille des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques Arséniés (HAP-As) et à des molécules complexes de haut poids moléculaires triphénylés et terphénylés, pour certains d'entre eux oxydés et possédant un seul atome d'arsenic. Il s'agit de sous-produits générés par la décomposition thermique partielle des chlorures de diphénylarsines et des recompositions moléculaires. Comme cela sera développé dans une sous-section spécifique du présent manuscrit, la décomposition partielle des chlorarsines se traduit aussi par la production de PCDD & PCDF (PolyChloroDibenzo-p-Dioxines et PolyChloroDibenzoFuranes), ces deux familles de molécules possédant une structure moléculaire diphénylée proche de celle des arsines (cf. Figure 346). Les dioxines et furanes dérivent des diphénylarsines par oxydation et le pontage des deux groupements phényls par un ou deux atomes d'oxygène, le départ de l'arsenic, et la redistribution des atomes de chlore en radicaux substitués sur les groupements phényls. Les arsines peuvent être, au même titre que les PCB (PolyChloroBiphényles), considérées comme des précurseurs à la formation, non intentionnelles, des PCDD & PCDF.

La présence de ces molécules atteste que la combustion des arsines n'a pas été systématiquement menée à son terme (minéralisation et destruction de toutes les liaisons organiques C-C), mais s'est arrêtée à un stade de production de radicaux très réactifs (molécules initiales déstructurées) conduisant à une recombinaison des molécules. La présence d'arsenic inorganique, dont les teneurs prévalent très largement sur celles, à l'état de traces, des formes organo-arséniées, témoigne de processus de combustion aussi arrivés à leur terme. Dans ce dernier cas de figure, se dégagent lors de la combustion H_2O, CO_2, HCl et l'arsenic oxydé (sous forme d'arséniates) qui se recombine avec d'autres métaux présents dans l'environnement des projectiles en cours de calcination, comme ceux libérés par les fusées d'artillerie, en particulier Zn, Cu, et le fer formant les *casings* des engins, sous forme de phases minérales amorphes et cristallisés. Les fractions charbonneuses ainsi que les oxyhydroxydes de fer générés par ces combustions forment aussi des substrats propices à l'adsorption et à l'immobilisation dans les résidus de brûlage des ETM et autres composés organiques. Le N-éthylcarbazole identifié à l'état de traces dans certains échantillons de résidus de brûlage provenant de la « Place à gaz », de Rampont et de Noire Fontaine était un agent toxique irritant mélangé à parties égales avec le chlorure de diphényarsine de certains projectiles chimiques allemands à *Croix bleue*. Il apparut tardivement, en 1918[1961].

[1960] Bausinger, T., Preuss, J. (2011) Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunition im Wald von Spincourt (Frankreich). *op. cit.*

[1961] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 10. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 25 novembre 1918. Rapport relatif des obus à + bleue de différents calibres. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

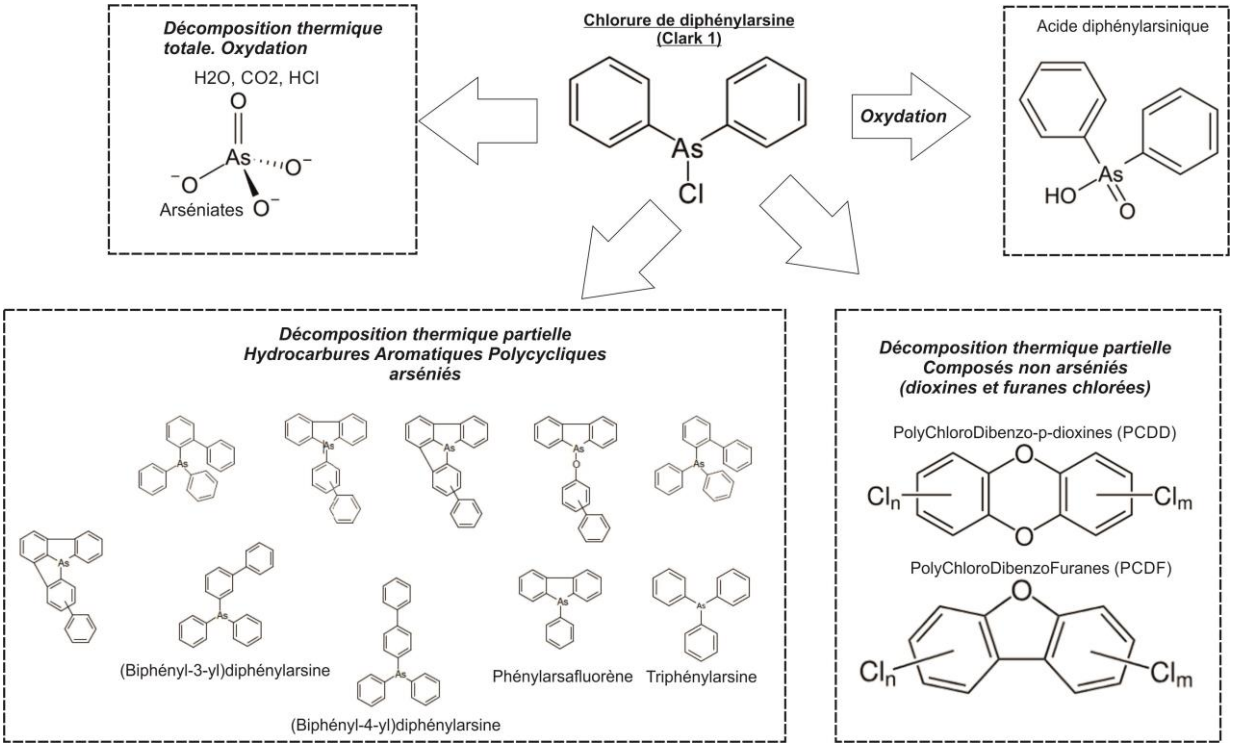


Figure 346 : Sous-produits organiques, organo-arséniés, et inorganiques, dérivant des chlorures de diphénylarsines.

Les quantifications en NAC les plus fréquentes, avec les teneurs les plus élevées, concernent majoritairement les di- et tri-nitrotoluènes (avec des radicaux NO_2^- en positions 1, 8 (1,8-dinitronaphtalène et 1,3,8-trinitronaphtalène)), le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) et ses métabolites, principalement les isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT), les isomères du dinitrotoluène (DNT) et des dinitrobenzènes (DNB). Il s'agit d'associations typiques des explosifs allemands et notamment ceux ayant chargés les munitions chimiques. Les compositions des chargements explosifs des obus à *Croix bleue* avait été identifiées par les laboratoires français et britanniques en charge, durant la Première Guerre mondiale, de l'étude des projectiles allemands récupérés sur le terrain. Selon les rapports d'expertise du Laboratoire Municipal de la ville de Paris, l'explosif était jaunâtre, hétérogène sur certains échantillons, et marqué par le faible pourcentage en azote comparativement au carbone, ce qui témoignait de la présence dans les explosifs des di- et tri-nitronaphtalènes[1962]. Les archives décrivent par ailleurs des obus à *Croix bleue* de 210 mm qui renfermaient des arsines dans un réservoir en tôle plongé dans un explosif à base de dinitrobenzène, la partie ogivale étant chargée en TNT[1963]. Le tryptique, TNT, DNB, TNN est aussi celui marquant les sols des terrains de brûlage de Zweedorf en Mecklembourg-Poméranie où furent éliminés des obus chimiques allemands et notamment des engins à *Croix bleue*.

La composition des sols en résidus d'explosifs est donc le reflet du chargement explosif des engins de guerre démolis puis de leur évolution environnementale une fois présents dans les sols.

[1962] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 11. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 12 novembre 1918. Rapport relatif à un obus de 10,5 à + bleue. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

[1963] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 17. 21 cm Blue Cross shell. Central laboratory BEF, 11th october 1918. Signé : W. Watson, Lt. – Colonel, Director.

La mise en évidence de teneurs élevées en arsenic total dans les sols ne suffit pas à elle seule à qualifier un site (pollué par As) de terrain de brûlage d'engins chimiques arséniés. En effet, l'arsenic était présent dans d'autres éléments constitutifs de munitions, qu'elles soient chimiques ou conventionnelles (i) les fusées d'artillerie allemandes formée d'un alliage Al-Zn-Cu renfermaient au regard des analyses effectuées aux alentours de 80 $mg.kg^{-1}$ MS d'arsenic, (ii) l'arsenic entrait dans la composition d'agents fumigènes associés aux agents chimiques toxiques liquides sous forme de trichlorure d'arsenic ($AsCl_3$).

L'artillerie chimique allemande a aussi utilisé en 1918 des obus à *Croix Jaune 1* chargés, si on s'en tient aux rapports d'expertise du Laboratoire Municipal de la ville de Paris, sous la direction d'André Kling (Figure 347 ci-contre). Ces projectiles contenaient environ 50% de dichloréthylarsine, 33% de dibromométhylarsine, le restant étant formé d'oxyde de méthyldichloré[1964]. La dichloréthylarsine ou *Dick* est un irritant sternutatoire très toxique, avec effets vésicants très douloureux et possibilité d'effets suffocants[1965]. L'oxyde de méthyle dichloré a un indice de toxicité très élevé. Lacrymogène à faibles concentrations, il perturbe également le sens de l'équilibre. Il servit de solvant (accélérant l'évaporation) avec effets irritants dans le mélange allemand dit à *Croix verte 3*[1966].

Figure 347 : André Kling (1872-1947). Directeur du Laboratoire Municipal de la Ville de Paris, membre de la Commission des gaz asphyxiants, chargé par le GQG des enquêtes concernant les toxiques de guerre[1967].

Les archives conservées aux Archives Nationales à Washington D.C., relatives aux comptages et statistiques effectués par l'AEF sur le contenu des dépôts de munitions ex-allemands fin 1918 précisent qu'environ 50% des munitions chimiques de ces dépôts étaient des engins à *Croix bleue* (cf. Section 3h du volet historique du présent manuscrit). Vraisemblablement les engins à *Croix Jaune 1* étaient-ils minoritaires au regard de ceux à *Croix bleue.* Ce type de munitions est caractéristique des projectiles de la dernière année de la Première Guerre mondiale sur le front occidental.

L'association de l'arsenic inorganique, des chlorures de diphénylarsine et de leurs sous-produits mobiles d'oxydation (acide diphénylarsinique) et de pyrolyse (triphénylarsine, As-HAP) constitue un indicateur infaillible d'opérations de destruction par brûlage d'engins sternutatoires arséniés allemands à *Croix bleue*.

[1964] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 49. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 27 juillet 1918. Rapport relatif à un obus de 10,5 contenant des arsines aliphatiques halogénées (obus à + jaune 1) et à des caffûts d'obus du même type. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

[1965] Bélot, H. *Agents chimiques de combat contemporains de la Première Guerre Mondiale*. Communication personnelle. Non publié.

[1966] *Ibid.*

[1967] Bibliothèque nationale de France. BnF Data. *André Kling*. https://data.bnf.fr/fr/12916400/andre_kling/

5.2.2 Evaluation des quantités historiques de munitions arséniées brûlées par l'exploitation du bilan massique de l'arsenic dans les sols. L'exemple de la « Place à gaz ». Discussion

Les investigations détaillées de la qualité des sols et des résidus de brûlage qu'ils supportent, menées sur les aires de brûlage de la « Place à gaz » en 2014 et notamment la caractérisation tridimensionnelle de la répartition des teneurs en arsenic total dans ces matériaux ont permis de proposer un bilan massique pour l'arsenic. Ce bilan et les investigations pénétratives sur lesquelles il repose sont présentés dans « *Hubé, D., Bâlon, P. (2019) Complexe de désobusage « Clere & Schwander » » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019* ». Cette quantité a été estimée à 15-16 tonnes. Ainsi, sachant que la décomposition thermique totale d'une mole de chlorures de diphénylarsine génère une mole d'arsenic et connaissant les masses molaires (en $g.mol^{-1}$) des deux composés, il est possible d'estimer les quantités de chlorure de diphénylarsine nécessaires pour produire – en théorie - 16 tonnes d'arsenic inorganique dans les sols. Cette quantité a été calculée (cf. Tableau 65) et s'élève à 56,6 tonnes d'arsines pouvant provenir du chargement d'environ 418 500 projectiles à *Croix bleu*e de 77 mm allongés renfermant 135 g d'arsines (une hypothèse initiale qui peut été avancée légitimement au regard des fioles et tessons de fioles identifiés), soit, pour une masse unitaire de l'obus de 6,88 kilogrammes, un tonnage en obus de 2 880 tonnes.

Il convient de noter ici que le nombre de projectiles est le double de celui renseigné par Forget (1928) concernant le dépôt de munitions qui avait été établi à La Gélinerie *« Rappelons que, dans la série domaniale de Gremilly, près de la ferme de La Gélinerie, a été constitué, en 1920, un dépôt considérable de plus de 200 000 obus allemands à gaz toxiques, de tous calibres, dont la désamorçage et la destruction, non encore terminés, sont assurés sur place par un concessionnaire du Ministère de la Guerre*[1968] *».* Le concessionnaire en question était l'entreprise F.N. Pickett & Fils (sous contrat militaire avec le Ministère de la Guerre). Ces 200 000 engins auraient-ils pu contenir, s'ils étaient tous à *Croix bleue*, les masses d'arsenic retrouvées au droit du site de la « Place à gaz » ?

Si on établit le postulat d'entrée que le bilan massique en arsenic est fiable et représentatif, que le dépôt de munitions liquidé par F.N. Pickett & Fils aurait renfermé des engins à *Croix bleue* d'un calibre supérieur à 77 mm, 56 tonnes d'arsine pouvaient être contenues dans les 200 000 obus indiqué par Forget (1928) réparties entre 63% d'engins de 105 mm (de 15,88 kilogrammes renfermant 370 grammes d'arsine) et 37% d'engins de 77 mm allongés (de 6,88 kilogrammes renfermant 135 grammes d'arsines[1969]) soit 2 500 tonnes de projectiles. La présence dans le dépôt de munitions liquidé par F.N. Pickett & Fils d'engins arséniés d'un calibre supérieur, comme 150 mm, n'est pas à exclure, même s'il n'existe aucun indice historique de cette occurrence (mais physique par la présence de tessons).

Les 2 500 tonnes formées d'engins de calibre 77 mm allongés et 105 mm comme les 2 800 tonnes de projectiles arséniés de 77 mm allongés permettraient toutes deux d'expliquer les masses d'arsenic introduites au droit de la « Place à gaz » mais n'expliquent pas les tonnages avancés dans les archives pour les opérations de destructions de munitions en Forêt de Spincourt.

[1968] Forget, J. (1928). *La reconstitution forestière de la zone rouge dans la Meuse, op. cit.*

[1969] Bélot, H. Communication personnelle.

Tonnage d'arsenic total dans les sols (tonnes).	16	Tonnes
Masse molaire de l'arsenic (g/mol).	74,92	g/mol
Nombre de moles d'arsenic dans les sols (mol).	213 561,1	mol
Masse molaire du chlorure de diphénylarsine (g/mol).	264,582	g/mol
Nombre de moles de chlorure de diphénylarsines décomposés (mol) dans les sols (mol).	213 561,1	mol
Tonnage de chlorure de diphénylarsines décomposés (tonnes).	56,5	Tonnes
Masse de chlorure de diphénylarsine dans un obus *Croix bleue* 77 mm allongé[1970].	135	Grammes
Nombre d'obus *Croix bleue* 77 mm allongé.	418 551	Unités
Masse d'un obus *Croix bleue* 77 mm allongé[1971].	6,88	Kilogrammes
Tonnage d'obus *Croix bleue* 77 mm allongé équivalent.	2 880	Tonnes

Tableau 65 : Evaluation des quantités d'arsine et de projectiles à Croix bleue détruits par brûlage sur le site de la « Place à gaz ».

Un document conservé au Centre des Archives Economiques et Financières précise la période durant laquelle le marché de démolition de munitions de F.N. Pickett & Fils était en vigueur et fait état des tonnages qui auraient été démolis en exécution de ce contrat « *Le marché de démolition de munitions passé avec M.M. Pickett & Fils le 15 juillet 1926 a été réglé définitivement le 29 septembre 1927, les sommes payées par le Parc d'Artillerie à l'entrepreneur au titre de ce marché s'élèvent à la somme de 490 729 f 37 correspondant à 8 692 tonnes 314, à 182 f 00 la tonne*[1972]».

En conclusion, le bilan massique indique que les 16 tonnes d'arsenic présents dans les sols et les résidus de brûlage de la « Place à gaz » auraient été issues de la décomposition totale et stœchiométrique de 56 tonnes d'arsines. Ces arsines auraient été contenues dans des obus d'un calibre compris entre 77 mm court[1973] et 210 mm[1974], renfermant respectivement entre 135 gr (pour un poids unitaire de 6,8 kg) et 3,85 kg d'arsines (pour un poids unitaire de près de 120 kg).

[1970] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-est. Etat-Major – 2e Bureau et Artillerie. *Artillerie allemande. Les projectiles*, *op. cit.*

[1971] *Ibid.*

[1972] Centre des Archives Economique et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote 4317-1, B 30035. Le Lieutenant-Colonel, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Chef du Service d'Apurement des comptes spéciaux du Trésor (Liquidation des stocks français). Metz, le 26 mars 1928. Signé illisible.

[1973] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général, Armées du nord et du nord est. Etat-Major, 2e Bureau et Artillerie. *Artillerie allemande. Les projectiles*, *op. cit.*

[1974] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 43. British Mission. 13 août 1918. 15 cm Blue cross shell, blind, received from C.A. Third Army. Fioles renfermant 800 gr d'arsines.

Les découvertes sur le terrain de tessons de fioles d'arsine correspondant aux calibres 77, 105 et 105 mm apportent des constats d'évidence que ces catégories d'engins ont été détruites sur ces sites.

La (trop) faible densité des sondages et investigations, ainsi que la grande hétérogénéité de la distribution spatiale des résidus arséniés (tranchées) sur les autres terrains de brûlage, comme à Trélon, Liessies, Westroozebeke, Vaudoncourt, Muzeray, Zweedorf n'ont pas permis d'établir un bilan des masses d'arsenic en présence dans les sols et résidus et par conséquence de proposer une évaluation des quantités d'engins à arsines éliminées.

Le tonnage en arsines équivalant à l'arsenic au droit de la « Place à gaz » de 56 tonnes aurait été renfermé entre près de 415 000 de projectiles de 77 mm (soit 2 820 tonnes de munitions) et 14 500 engins de 210 mm (soit 1 740 tonnes de munitions). Il existe donc une incertitude sur le nombre et le tonnage de munitions détruites au droit de la « Place à gaz » par OB du fait de l'absence d'informations sur les calibres des engins détruits, et l'écart entre les quantités annoncées par Forget (1928) (200 000 projectiles chimiques), et celles des tonnages identifiés dans les documents conservés au CAEF (8 700 tonnes).

5.3. TRACEURS DE LA NEUTRALISATION D'ENGINS A CHARGEMENT CHIMIQUE TOXIQUE NON ARSENIE

5.3.1 Projectiles lacrymogènes à chargement liquide organo-bromé

Les résultats analytiques sur les échantillons issus de la fosse nord-est de la « Place à gaz » exposés dans ce qui précède montrent que la composition chimique des résidus comblant cette fosse est très singulière. Des teneurs en plomb mesurées dans les échantillons de résidus sont très élevées (comprises entre 31 000 et 143 922 $mg.kg^{-1}$ MS), comparativement à celles relevées dans les résidus de brûlage de la clairière.

La particularité du chimisme des résidus de brûlage comblant cette fosse est l'occurrence d'espèces bromées. De fortes teneurs en brome total lixiviable, jusqu'à 57 $mg.L^{-1}$, ont été mesurées dans ces résidus, tandis que l'iode total reste à l'état de traces n'excédant pas 73 $\mu g.L^{-1}$. Les analyses qualitatives de recherche des liaisons organiques (*screenings*) réalisées par le laboratoire Envilytix GmBH sur ces échantillons montrent l'occurrence d'une grande diversité de composés organo-bromés, majoritairement mono-aromatiques (comme les bromures de benzyle et de xylyles, les bromo-benzènes, di- et tri-méthyls, etc.). Enfin, les résidus sont aussi marqués par les PBDD & PBDF (PolyBromoDiphényl-p-Dioxines & PolyBromoDiphénylFuranes), jusqu'à 82 000 $ng.kg^{-1}$ MS (∑PBDD + PBDF). Les congénères des dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF) chlorés sont aussi présentes, et nettement dominées par les PCDF (86% de ∑(PCDD + PCDF)).

On retrouve aussi dans cette fosse de fortes teneurs en arsenic total (avec un maximum mesuré s'élevant à 11 000 $mg.kg^{-1}$ MS), associées à des composés organo-arséniés dérivant des chlorures de diphénylarsines (avec ADPA jusqu'à 17 mg $ADPA.kg^{-1}$ MS, et des traces de triphénylarsine (TPF) et 9-phenylfluorène (PAF) sur les lixiviats). Des traces d'explosifs (dinitronaphtalènes notamment, < 1 $mg.kg^{-1}$ MS) ont également été détectées. Ces résidus sont particulièrement riches en fioles d'arsines vides (ou remplies d'un résidu noir et goudronneux) et en tessons de verre vert issus du bris des fioles. Un projectile calciné a aussi été dégagé de cette fosse. La coloration rouge brique des terrains formant l'assise de la fosse est liée à la présence d'oxydes de fer comme ceux observés dans les terrains rubéfiés. La rubéfaction est une coloration rouge (altération chromatique) typique des matériaux ayant subi un incendie, une élévation importante de la température. Elle est provoquée par l'oxydation des minéraux ferrugineux présents lorsque ceux-ci sont soumis à une température élevée.

Les résidus calcinés, l'occurrence de fortes teneurs en dioxines et furanes, chlorées et bromées, ainsi que les terrains naturels rouge brique riches en oxydes de fer, à la base de cette fosse, constituent des indices que les matériaux comblant cette fosse ont été portés à une température élevée. Des fioles d'arsine et/ou des projectiles chargés de fioles d'arsine ont été neutralisés dans cette fosse où furent pratiqués des brûlages. Une hypothèse serait que les fioles d'arsines partiellement brûlées par la ou les tranchées de brûlage (une combustion incomplète et une reprise du brûlage des imbrûlés relatées dans les archives (cf. Section 11h du volet historique du présent manuscrit) aient été rassemblées dans cette fosse pour être brûlées pour finaliser la neutralisation des arsines.

Le chimisme de ces résidus est singulier et n'a été rencontré nulle part ailleurs sur des *Burning Grounds*, qu'il s'agisse de la « Place à gaz » ou des autres sites visés par la présente recherche. L'association du plomb, du brome libre et lixiviable, des composés organo-bromés monoaromatiques et phénylés peut s'expliquer par la neutralisation par le brûlage, au côté des fioles d'arsine, d'obus à chargement lacrymogène du type *T-Stoff*, un agent bromé dont le caractère corrosif nécessitait son conditionnement dans un réservoir en plomb placé dans les obus (cf. Figure 348 ci-contre). Au début de la guerre, les Allemands se servirent du bromure de benzyle (C_6H_5-CH_2Br) (*Cyclite*, pour les Français) à la place du bromure de xylyle (BrH_2C-C_6H_4-CH_2Br), dans des obus à vase de plomb[1975]. Enfin, on ne peut exclure que d'autres toxiques bromés lacrymogènes aient été détruits par brûlage dans cette fosse (comme la bromacétone ($BrCH_2$ $COCH_3$) ou le bromométhyl-éthylcétone (CH_2Br COC_2H_5)). A noter que sous sa forme liquide, le brome (Br_2) n'a servi de chargement qu'à des projectiles allemands de 90 mm à bouteilles de verre[1976].

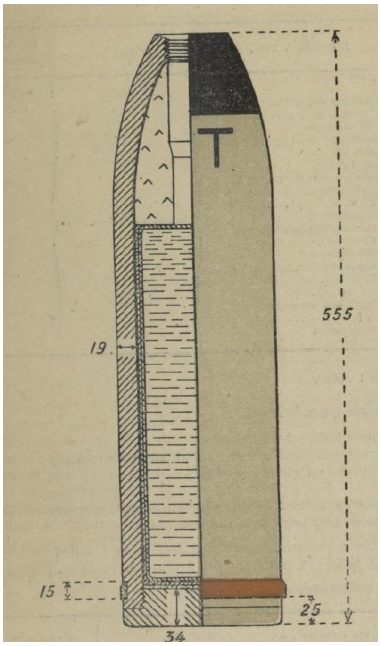


Figure 348 : Obus chimique allemand lacrymogène à « T-Stoff » dans un vase en plomb[1977].

Aucune source archivistique ne fait mention sur ce site de brûlage de la destruction de ce type d'engins chimiques.

5.3.2 Chargements chimiques non arséniés, non bromés

D'autres indices collectés sur les terrains de la « Place à gaz » et de Noire Fontaine, témoignent que des obus chimiques autres que ceux arséniés à *Croix bleue* et ceux lacrymogènes bromés ont été neutralisés sur ces sites de brûlage. En effet, des fusées d'artillerie marquées par une croix frappée à froid ont été découvertes sur ces deux sites. Ces marques signalaient la présence, au sein des projectiles que ces fusées équipaient, d'un chargement liquide (nécessitant la cimentation de la fusée au corps de l'obus par un ciment oxymagnésien).

[1975] Bélot, H. *Agents chimiques de combat contemporains de la Première Guerre Mondiale*. Communication personnelle.

[1976] *Ibid*

[1977] Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-est. Etat-Major – 2e Bureau et Artillerie. *Artillerie allemande. Les projectiles*, *op. cit*. p. 377.

Les arsines, solides, n'entraient pas dans cette catégorie de toxiques. A noter que certains obus à *Croix bleue* étaient dotés de fusées marquées par trois croix de ce type. Ensuite, le monochlorobenzène (MCB) a été recherché dans 51 échantillons provenant des sites de la « Place à gaz » et Clere & Schwander de Noire Fontaine et Rampont. Cette molécule a été quantifiée sur 31% des échantillons (16 points positifs) avec des teneurs comprises entre 0,04 et 20,1 mg.kg^{-1} MS. Le MCB est un solvant à haut point d'ébullition utilisé par les Allemands pour fluidiser l'*Ypérite* au soufre. Le tétrachlorure de carbone (CCl_4) était aussi utilisé comme solvant.

Au moins un composé soufré de la famille des thianes (1,4-dithiane, 1,2,5-trithiépane, 1,4-oxathiane et 1-oxa-4,5-dithiépane) a été recherché dans 56 échantillons provenant de ces trois sites ; ces molécules ont été quantifiées sur 7 points avec des teneurs comprises entre 0,09 mg.kg^{-1} MS (1,2,5-trithiépane) et 1,21 mg / kg MS (1,4-dithiane). Les thianes ont été quantifiées dans des échantillons marqués par le MCB. Les thianes sont associées aux *Ypérites* au soufre (« gaz moutarde », sulfure d'éthyl dichloré distillé (HD)) dont elles confèrent l'odeur alliacée caractéristique. Les thianes peuvent avoir plusieurs origines (i) impuretés d'origine industrielle, (ii) sous-produit de recomposition thermique des *Ypérites* (combustions incomplètes). et (iii) la dégradation et la cyclisation des sulfures d'éthyl dichlorés[1978].

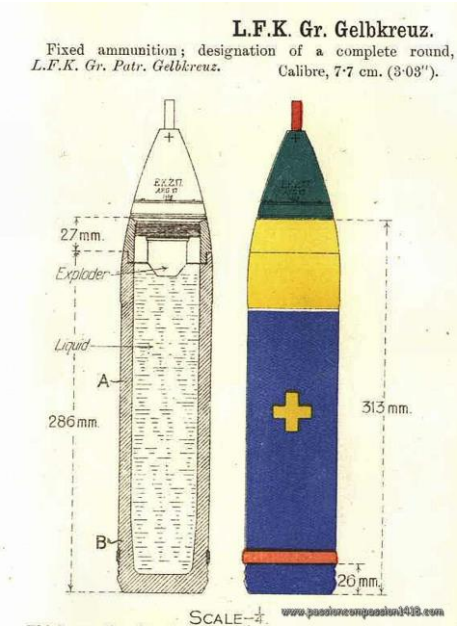


Figure 349 : Obus chimique allemand à Croix jaune de calibre 77 mm long chargé d'Ypérite au soufre.

Cette empreinte constatée dans les sols à Noire Fontaine, fut également mise en évidence dans les eaux souterraines au droit de ce site. Le piézomètre PZ-NF-01 a été implanté au droit de cette zone et capte sur 15 m environ la nappe des marno-calcaires de la Dalle d'Etain (dont le niveau statique s'établit vers 2,6 m, ce qui correspond peu ou prou avec le niveau des eaux au sein des entonnoirs d'explosion proches voisins). Ces eaux montrent, en mars 2019, la présence de composés typiques des toxiques de guerre des projectiles à *Croix bleue* et à *Croix jaune* : l'acide diphénylarsinique (1,72 µg.L^{-1}) et l'oxyde de triphénylarsine (0,66 µg.L^{-1}) dérivant des arsines en engins à *Croix bleue* et la 1,4-dithiane (0,78 µg.L^{-1}), 1,4-oxathiane (0,51 µg.L^{-1}) et 1-oxa-4,5-dithiépane (0,46 µg.L^{-1}) caractéristiques des *Ypérites* au soufre (chargeant les engins à *Croix jaune*).

Cette occurrence concomitante de thianes et de monochlorobenzène témoigne du déchargement de munitions allemandes à *Ypérite*, comme ceux à *Croix jaune* (qui sont apparus sur le front en 1917) (cf. Figure 349). A noter que les sous-produits de transformation environnementale des sulfure d'éthyl dichlorés (*Ypérites*) comme les thiodiglycols, les chloroéthyl sulfures, sulfones et sulfoxydes, hydroxyethyl sulfures et sulfones n'ont pas été quantifiés à des teneurs supérieures aux limites de quantification appliquées par le laboratoire (0,1 µg.L^{-1}). Ces composés n'ont pas été recherchés dans les eaux souterraines.

[1978] Chmielińska, K., Hubé, D., Bausinger, T., Simon, M., Rivière, G., Fauser, P., & Sanderson, H. (2019). *Environmental contamination with persistent cyclic mustard gas impurities and transformation products. Global Security: Health, Science and Policy*, 4(1). 14–23. https://doi.org/10.1080/23779497.2019.1699848

5.4. L'ETAIN. UNE SINGULARITE EN LIEN AVEC LA NEUTRALISATION DE PROJECTILES CHIMIQUES

Une des particularités des pollutions métalliques marquant les sols au droit des anciens sites de destruction de munitions est l'occurrence quasiment systématique, parfois à des teneurs très élevées (jusqu'à 69 $gSn.kg^{-1}$ MS au droit de l'usine Clere & Schwander de Rampont (Muzeray)) de l'étain (Sn). Comme le montrent les statistiques et l'ACP exposées dans ce qui précède, cet élément ne semble pas être directement et systématiquement corrélé avec les autres éléments marquants les sols, en particulier As, Zn, Cu, Cd, Pb.

L'étain était un métal utilisé pour la confection de certains projectiles renfermant des chargements agressifs (comme l'acide picrique) pour préserver (par étamage) l'acier de l'intrados du corps des munitions de la corrosion. Cet élément entrait aussi dans la composition des toxiques de guerre comme agent fumigène (tétrachlorure d'étain $SnCl_4$ ou « Liqueur de Libavius »).

Les teneurs les plus élevées ont été relevées au droit de l'usine de Rampont, dans sa partie nord-est, correspondant aussi au point topographique le plus bas du site (cf. Figure 350). Il n'existe aucune information archivistique concernant ce secteur. Les photographies aériennes anciennes de 1922 montrent des sols nus, probablement dépourvus de végétation formant deux taches distinctes de dimensions semblables et desservies par une voie de chemin de fer depuis l'usine. Ces zones ont été identifiées comme incultes sur le cadastre dressé en 1997. Une analyse fine des photographies aériennes anciennes permet d'identifier des structures linéaires parallèles et régulièrement espacées. L'étain s'y présente avec des teneurs exceptionnellement élevées (69 $gSn.kg^{-1}$ MS) dans le premier mètre de terrain, décroissant en teneurs ainsi rapidement avec la profondeur.

Ces teneurs en étain sont associées à celle de l'arsenic (13 $gAs.kg^{-1}$ MS) et en moindre mesure en plomb (1,3 $gPb.kg^{-1}$ MS). Il s'agit des teneurs en étain et en arsenic les plus élevées mesurées dans les trois entités formant le complexe Clere & Schwander dans le canton de Spincourt. Les investigations réalisées (sondages à la pelle mécanique, forage d'un piézomètre) et les investigations géophysiques n'ont révélé aucun indice de présence de résidus de brûlage portant une charge métallique importante (raison pour laquelle, les dioxines et furanes chlorées n'ont pas été recherchées sur ces zones).

A noter par ailleurs que les eaux souterraines de la nappe de la Dalle d'Etain, montrent au droit de ces zones (piézomètre PZ-RAMP-2) la présence anomalique de brome total (180 à 237 $mgBr.L^{-1}$), chlorures (66,3 à 76,1 $mgCl.L^{-1}$) et de traces (9,73 $\mu g.L^{-1}$) de 1,4-oxathiane, une impureté cyclique soufrée des *Ypérites* au soufre. L'hypothèse qui peut être émise ici concernant la nature de ces zones serait celle de tranchées ou de puits d'infiltration de toxiques de guerre liquides et d'agents fumigènes stanniques ou arséniés ($SnCl_4$, $AsCl_3$), procédé d'infiltration décrit dans les archives relatives aux installations de désobusage Clere & Schwander du canton de Spincourt (département de la Meuse) et de la forêt de la Hardt (département du Haut-Rhin). A noter que les sous-produits de transformation environnementale des sulfure d'éthyl dichlorés (*Ypérites*) comme les thiodiglycols, les chloroéthyl sulfures, sulfones et sulfoxydes, hydroxyethyl sulfures et sulfones n'ont pas été recherchés.

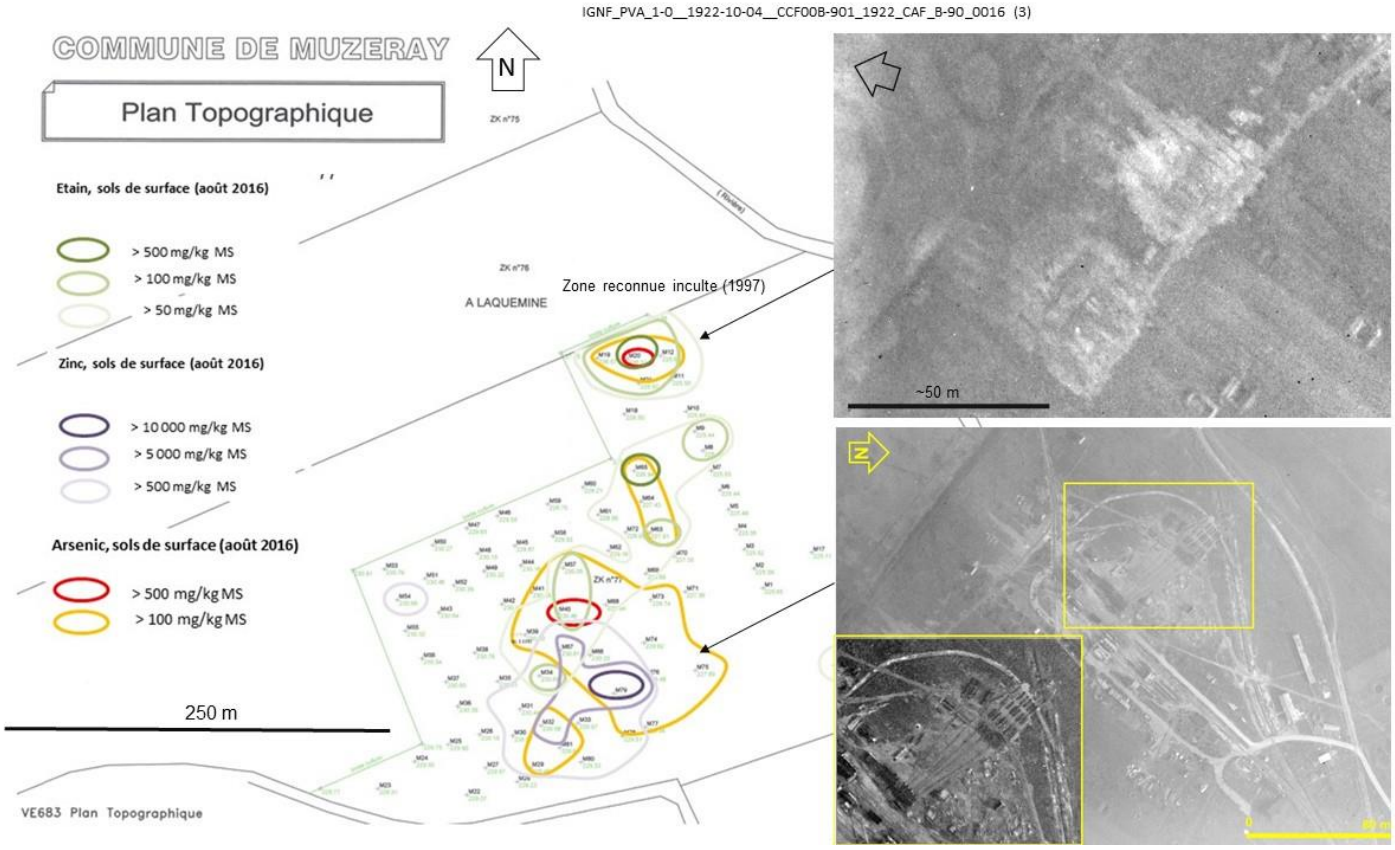


Figure 350 : Les trois zones de pollution concentrées en étain (Sn). Zinc (Zn) et Arsenic (As) reconnues dans les sols au droit de l'ancienne usine de désobusage Clere & Schwander de Rampont (commune de Muzeray, Meuse). En haut à gauche, les deux taches très marquées en étain sur orthophotographie de 1922[1979].

Enfin, toujours à Noire Fontaine, les résidus cendreux comblant le « puits de brûlage » présentent des teneurs relativement faibles en arsenic (avec un maximum de 310 mgAs/ kg MS), des teneurs en zinc proche du fond géochimique local, mais des teneurs élevées en étain avec un maximum de 2,8 $gSn.kg^{-1}$ MS. Des teneurs significatives en monochlorobenzène (> 10 $mgMCB.kg^{-1}$ MS), solvant des *Ypérites* allemandes, ont aussi été mesurées dans ces matériaux. A noter que ce puits est vraisemblablement situé à l'emplacement des anciennes cornues de vidage des munitions chimiques et l'atelier de « perçage » de bombes de tranchées (qui pouvaient renfermer des agents fumigènes à base de $SnCl_4$). Une hypothèse plausible est celle d'un entonnoir de pétardement ouvert en fin d'exploitation des installations pour liquider les munitions résiduelles, puis ayant servi de puits de brûlage d'engins et des matériaux de démantèlement (dépotoir).

On constate donc que les occurrences de fortes teneurs en étain sont associées à des cortèges de substances caractéristiques des *Ypérites*. L'étain entraient donc possiblement dans la charge fumigène accompagnant les obus à *Croix jaune*.

[1979] Extrait de Hubé, D., Bâlon, P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final*. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019.

5.5. LES POLYCHLORODIBENZO-P-DIOXINES (PCDD) ET POLYCHLORODIBENZO-FURANES (PCDF). TEMOINS MUETS ET PERSISTANTS DES CONDITIONS ET PRATIQUES DE BRULAGE DES REG ?

5.5.1 Définitions

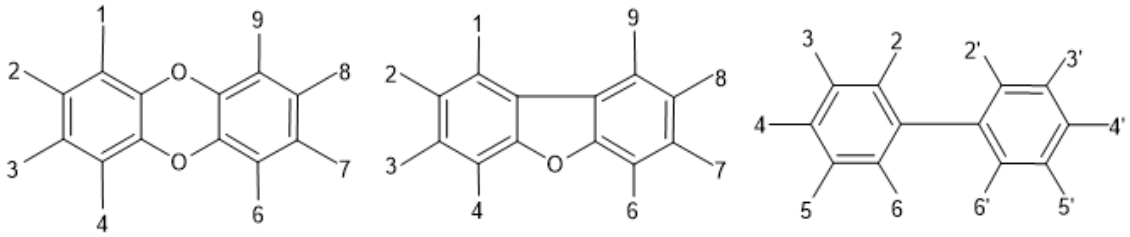
Les PCDD & PCDF (PolyChloroDibenzo-p-Dioxines & PolyChloroDibenzoFuranes) forment une famille de composés organo-chlorés, hétérocycliques et aromatiques polycycliques chlorés polysubstitués, persistants dans l'environnement, possédant deux noyaux aromatiques pontés par une (furanes) à deux (dioxines) liaisons C – O – C (cf. Figure 351) Les différentes molécules, où congénères, diffèrent par le nombre et la position des radicaux chlore sur les cycles aromatiques. Dioxines et furanes possédant le même nombre de chlore constituent un groupe homologue d'isomères.

Les PolyChloroDibenzo-p-Dioxines (PCDD) incluent la dioxine dite « Seveso » (2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD)), la plus toxique de toute cette famille de molécules, générée et émise lors de l'accident industriel dans la commune du même nom, en Italie, en 1976 et qui mit en exergue l'existence de ces composés produits de façon non intentionnelle et leurs effets CMR (Cancérigène, Mutagène et Reprotoxique). Les enjeux liés aux PCDD & PCDF furent réactivés à la faveur de l'évaluation environnementales des effets des agents défoliants « orange » (herbicide non sélectif formé d'un mélange à parts égales de d'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D) et d'acide 2,4,5-trichlorophénoxyacétique (2,4,5-T) renfermant la TCDD en impuretés) pulvérisés par l'Armée américaine par voie aérienne au-dessus des jungles du Vietnam (entre 1961 et octobre 1971), puis des pollutions liées aux incinérateurs d'ordures ménagères.

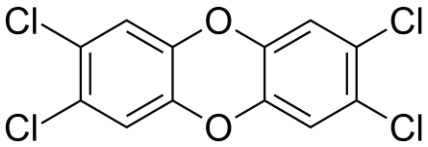
Ces PCDD sont toutes des dérivés de la dibenzo-p-dioxine, 210 types de composés sont apparentés à ce type de dioxine (dits « congénères »), 75 congénères (molécules proches, dont le nombre et l'emplacement des atomes de chlore diffèrent), dont dix-sept très toxiques et sept particulièrement toxiques, le plus dangereux étant la TCDD.

Les PolyChloroDibenzoFuranes (PCDF) ou furanes dérivent du dibenzofurane. Il en existe 135 isomères, dont dix ont des propriétés analogues à celles de la dioxine.

Parmi les nombreux congénères de dioxines et furanes, seuls les congénères considérés comme les plus toxiques et les plus présents dans l'environnement sont régulièrement dosés au laboratoire, à savoir <u>sept PCDD et dix PCDF</u>. Les <u>PCB de type dioxine</u>, possédant une structure chimique analogue, ou « PCB *Dioxin-Like* » (PCB-DL), comprennent à la fois les congénères non-ortho substitués ou coplanaires (4 congénères) et les congénères mono-ortho substitués, chlorés en une position ortho (huit congénères). Les 12 PCB-DL ont un comportement environnemental similaire à celui des dioxines.



Congénères de la dioxine (PCDD)	Congénères de la furane (PCDF)	Les douze analogues PCB *Dioxin-Like*
2,3,7,8 TCDD	2,3,7,8 TCDF	PCB n° 77
1,2,3,7,8 PeCDD	1,2,3,7,8 PeCDF	PCB n° 81
1,2,3,4,7,8-HxCDD	2,3,4,7,8 PeCDF	PCB n° 126
1,2,3,6,7,8 HxCDD	1,2,3,4,7,8-HxCDF	PCB n° 169
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1,2,3,6,7,8 HxCDF	PCB n° 105
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	2,3,4,6,7,8 HxBDF	PCB n° 114
Octa CDD	1,2,3,7,8,9-HxCDF	PCB n° 118
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	PCB n° 123
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	PCB n° 156
	Octa CDF	PCB n° 157
		PCB n° 167
		PCB n° 189



2,3,7,8-tétrachlorodibenzodioxine dite « dioxine Seveso »

Figure 351 : Formules structurales des PolyChloroDibenzo-para-Dioxines, des PolyChloroDibenzoFuranes et PolyChloroBiphényles Dioxin-Like. Enumération des congénères et des analogues analysés.

5.5.2 Provenance des échantillons analysés pour les dioxines et furanes

Ces molécules à hauts poids moléculaires ont été analysées dans les sols et les résidus de tous les sites brûlage de REG étudiés dans le cadre de cette recherche à l'exception de ceux d'Audruicq et de Zweedorf, ces molécules n'ayant pas été recherchées par les auteurs à l'origine des données analytiques sur ces sites (respectivement T. Bausinger et J. Preuss). Un jeu de données considérable totalisant 97 analyses de PCDD & PCDF (dont deux échantillons de sédiments d'un ruisseau attenant au *Burning Ground* du Bois l'Abbé à Liessies) a pu être constitué à la faveur de cette recherche, soit 1 649 paramètres analytiques (sept congénères pour les dioxines (tétra- à octa-chlorées) et 10 pour les furanes (tétra- à octa-chlorées)) (cf. Figure 351 ci-dessus, pour rappel). Un échantillon de résidu de brûlage provenant de la tache centrale de la « Place à gaz » a été analysé pour la recherche des douze analogues PCB-DL. Deux échantillons ont été constitués en janvier 2015 d'une part dans les résidus comblant la fosse nord-est de la « Place à gaz » et d'autre part dans les sédiments du lit d'un ruisseau situé à 50 m en aval topographique de la « Place à gaz » pour l'analyse par le laboratoire spécialisé DIOXLAB des PBDD & PBDF (PolyBromoDibenzo-p-Dioxines et PolyBromoDibenzoFuranes). Ces analyses complètent d'autres visant spécifiquement les composés bromés ; les résultats analytiques et leur interprétation font l'objet d'un développement spécifique dans le présent manuscrit. Ce jeu de données portant sur des résidus de brûlage de projectiles datant de la Grande Guerre fut complété par des résultats analytiques provenant de l'analyse des PCDD & PCDF d'échantillons de résidus de brûlage de matériels plus récents, dans le but d'apprécier les éventuels écarts et convergences entre les signatures chimiques et mettre en exergue de potentielles signatures spécifiques à la Grande Guerre.

Ces analyses trouvent aussi tout leur intérêt dans cette recherche car elles fournissent des résultats analytiques en dioxines et furanes chlorées sur des échantillons marqués par des opérations de brûlage de munitions conventionnelles alors que la majorité des données provenant des sites post 1914-1918 sont en lien avec la destruction d'engins à chargements spéciaux (surtout chimiques). Il s'agit de (i) deux échantillons provenant de résidus de grillage d'obus allemands anti-char et anti-aérien percutants de 20 mm (type « *Solothurn* ») affleurant sur le site de destruction de munitions (des deux guerres mondiales (contrats Ricome de l'entre-deux-guerres et post Seconde Guerre mondiale) et du matériel délaissé par l'armée US de l'OTAN dans les années 60, du Ravin du Chaufour à Douaumont (département de la Meuse), (ii) quatre échantillons de résidus de brûlage d'une soute d'OB et d'une alvéole de brûlage d'*airbags* du site de rebutage de munitions de l'entreprise SIMT (Société Industrielle de Munitions et Travaux) à Saint-Martin-de-Crau (département des Bouches-du-Rhône) (cf. Figure 352). Cette entreprise, en liquidation en 2006, dénaturait jusque dans le début des années 2000, obus, bombes, torpilles, missiles et SAA (*Small Arms Ammunition*) de tous calibres pour le compte de l'Armée française.

Résidus de grillage d'obus de 20 mm « Solothurn » au Ravin du Chaufour (Douaumont, Meuse)[1980].

Obus de 20 mm allemands « Solothurn » anti-char (en haut) et anti-aérien (en bas) neutralisés. Ravin du Chaufour[1981].

Soute de brûlage de matériel de guerre de l'armée française recouverte de plaque blindée en acier. Site SIMT de Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône)[1982].

Figure 352 : Résidus de brûlage modernes des sites du Ravin du Chaufour (Douaumont, Meuse) et SIMT à Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône). Aperçu photographique.

5.5.3 Profils de teneurs des congénères et signatures chimiques des PCDD & PCDF

Profils des teneurs et signatures chimiques

- **Gammes de teneurs mesurées**

Les résultats analytiques sont rassemblés dans les tableaux placés en Annexe G. La Figure 353 représente les données (i) de la somme des teneurs mesurées en PCDF versus celles mesurées en PCDD, (ii) de la fraction des furanes ∑(PCDF) par rapport à ∑(PCDD + PCDF). N'ont été exploitées dans ces graphiques que les données pour lesquelles les teneurs en dioxines et furanes chlorées ont été quantifiées (n = 94 couples PCDD /PCDF).

[1980] Hubé, D. (2013).

[1981] *Ibid.*

[1982] Hubé, D. (2017).

Les jeux de données les plus exhaustifs ont été constitués pour les sites de la « Place à gaz », de Noire Fontaine (Vaudoncourt) et de Rampont (Muzeray). La disparité des profils des teneurs des terrains de brûlage de la *C-Factory* de Trélon et Liessies aurait mérité d'être explorée plus avant pour établir un lien plus solide et fiable entre typologie de résidus de brûlage, munitions détruites et pratiques de brûlage. Seule une représentation des données quantitatives sous échelle logarithmique permet de visualiser la disparité des données de teneurs.

Les teneurs (∑(PCDD + PCDF)) s'élèvent dans l'environnement des terrains de brûlage aux alentours de 70 $ng.kg^{-1}$ MS, excédant les 1 000 $ng.kg^{-1}$ MS à proximité des terrains pour monter au-delà des 10 000 $ng.kg^{-1}$ MS dans les sols de surface au droit des terrains de brûlage. Lorsque des résidus de brûlage sont présents en surface ou sous terre, en comblement de tranchées, des teneurs exceptionnelles et extrêmes ont été mesurées, s'élevant jusqu'à 4 000 000 $ng.kg^{-1}$ MS. Le ratio entre teneurs des sols de surface et les teneurs dans les résidus de brûlage sous-jacents correspond en environnement agricole (Rampont, Noire Fontaine, Westroozebeke) à un taux de dilution par le labour difficilement quantifiable ici du fait du manque de données.

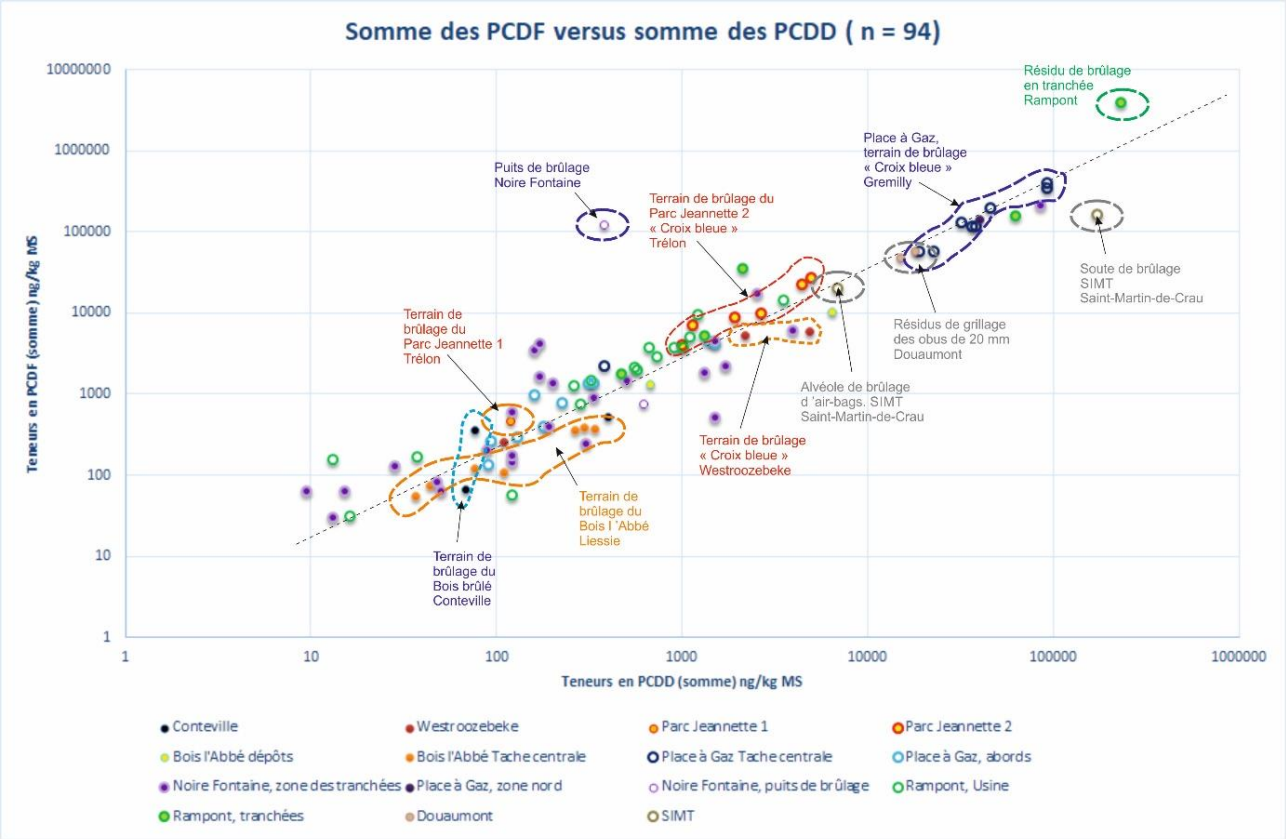
- **Profils de teneurs**

Les profils de teneurs correspondent à la distribution des teneurs pour chaque homologue, tétra- à octa-chloré pour les PCDD d'une part et les PCDF d'autre part. La Figure 353 permet de visualiser (i) la distribution des teneurs, (ii) le degré de corrélation entre PCDD et PCDF et (iii) différentes populations possédant différents profils de teneurs.

La tendance générale des signatures chimiques des teneurs en PCDD & PCDF mesurées dans les sols et les résidus de brûlage qui se dégagent de l'analyse statistique est celle d'une nette prévalence des furanes sur les dioxines, les ∑PCDF représentant généralement plus de 70% de ∑(PCDD + PCDF). Parmi ces furanes, ce sont les homologues les moins chlorés (tétra-chlorés, TCDF), et en moindre mesure les homologues penta-, hepta-, qui prédominent.

Cette signature n'a pas été systématiquement observée. Des signatures singulières ont été ponctuellement identifiées.

Les résidus comblant la fosse à Noire Fontaine (Vaudoncourt) se singularisent par une signature chimique déjà dans un premier temps (i) très nettement marquée par les furanes et dans un second temps, (ii) dominée par les furanes les plus hautement chlorées (octa-, OCDF). Des profils de teneurs dominés par les homologues de PCDF ou PCDD les plus hautement chlorés ont aussi été mis en évidence dans les résidus de brûlage de l'usine Clere & Schwander à Rampont et dans les résidus de brûlage du Bois Brûlé à Conteville. Les résidus de la tranchée 2a (Rampont, Muzeray) ouverte par sondage à la pelle mécanique en février 2018 se distinguent par des teneurs extrêmes, jusqu'à 4 000 000 $ng.kg^{-1}$ MS (∑(PCDD + PCDF)), mais aussi par une prévalence parmi les homologues des PCDD et PCDF des octa-furanes (OCDF). Ces résidus n'ont pas été analysés pour les métaux. La tranchée parallèle (échantillons tranchée 1a), est fortement marquée par les furanes et aussi par l'arsenic (à hauteur de 3 200 $mgAs.kg^{-1}$ MS et l'étain à hauteur de 1 900 $mgSn.kg^{-1}$ MS).



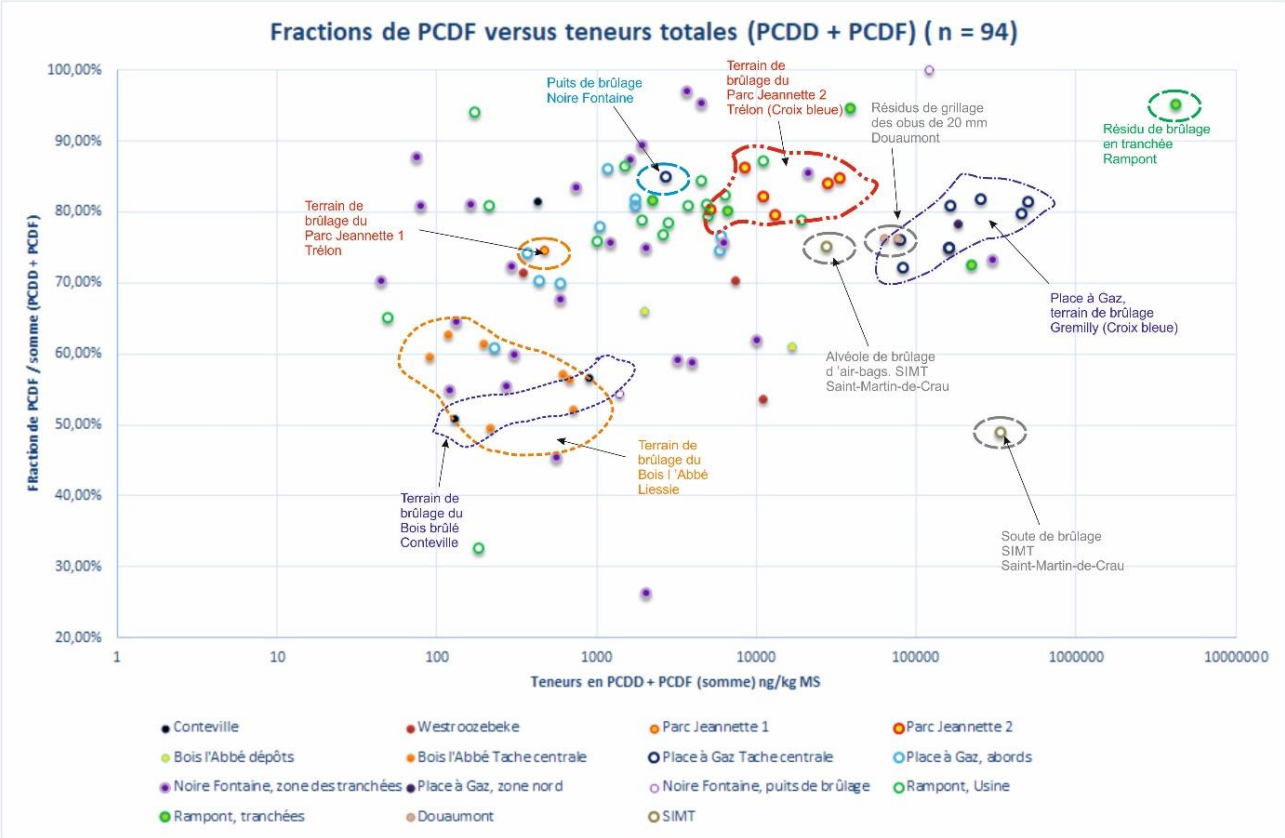


Figure 353 : ∑PCDF versus ∑PCDD (en haut) et ratio ∑PCDF / (∑PCDD + PCDF) versus teneurs mesurées (∑(PCDD + PCDF).

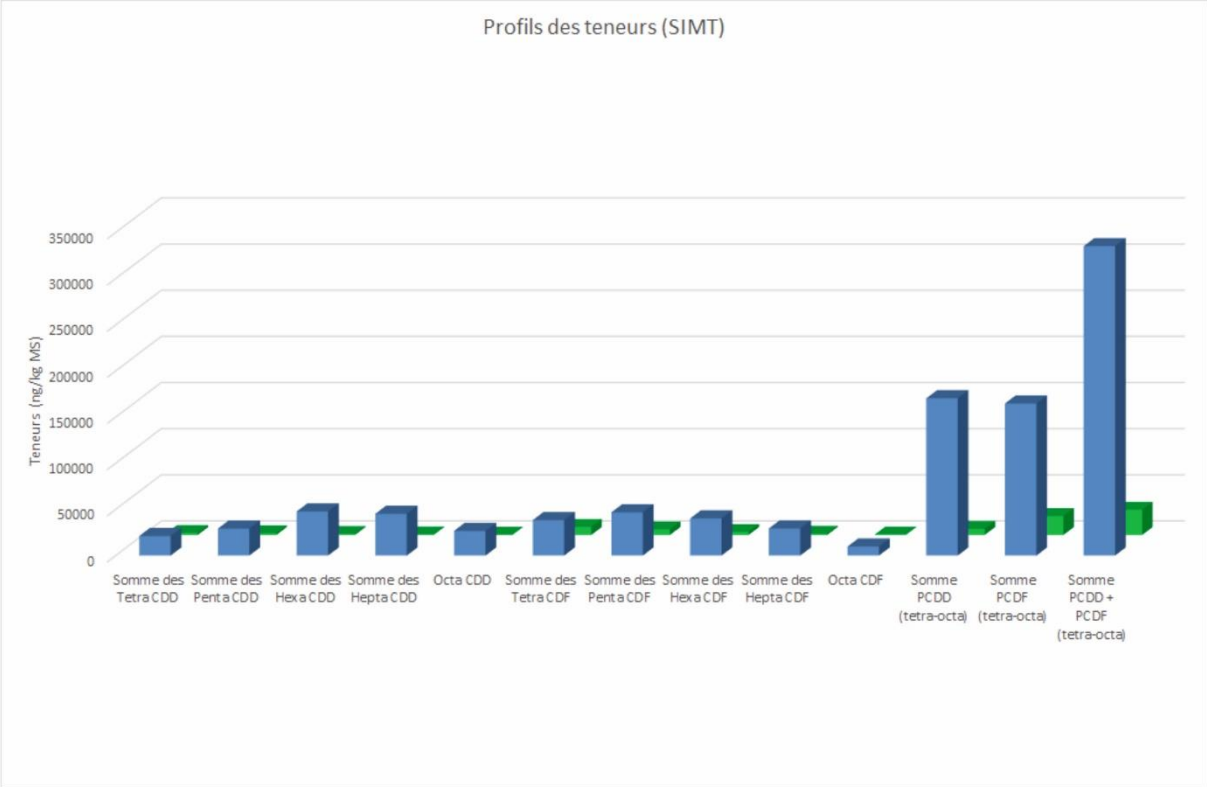
- **Profils des teneurs des sites de destruction de munitions conventionnelles**

Les résidus de la soute de brûlage de la SIMT (cf. Figure 354) s'individualisent par ∑PCDD ~ ∑PCDF et des profils des PCDD et PCDF sensiblement identiques, dominés par des homologues globalement hautement chlorés (essentiellement hexa-, hepta- dioxines et furanes). Les teneurs en ∑(PCDD + PCDF) sont très élevées avec 335 245 ng.kg^{-1} MS. Cette soute n'a à priori jamais brûlé d'engins à chargements chimiques. Concernant les résidus de grillage des obus *Solothurn* de 20 mm du Ravin du Chaufour (cf. Figure 354), autre site de brûlage d'engins conventionnels, le profil des teneurs est conforme à celui observé dans la majorité des échantillons issus des *Burning Grounds* de l'entre-deux-guerres, à savoir ∑PCDF >>∑PCDD avec une prévalence des homologues bassement chlorés (tetra-, penta-CDF). A Conteville, là où des engins à priori non chimiques ont été brûlés, on constate une disparité des profils des teneurs, parmi les trois échantillons composites collectés au sein d'un périmètre pourtant restreint (20 x 20 m environ). Les PCDF prévalent toujours sur les PCDD, mais un échantillon est particulièrement marqué en OCDD (dioxines les plus hautement chlorées).

Les plus faibles teneurs en PCDD et PCDF au sein des résidus de brûlage ont été mesurées sur les sites de brûlage du Bois Brûlé à Conteville et sur le terrain de brûlage du Bois l'Abbé à Liessies (∑(PCDD + PCDF) < 1 000 ng.kg^{-1} MS) et ce sont aussi ceux possédant les ratios ∑PCDF / ∑(PCDD + PCDF) les plus faibles (entre 40 et 70%). La signature PCDD y est dominée par les dioxines octa-chlorées. Mais là aussi la contribution des furanes reste généralement majoritaire (∑PCDF > ∑PCDD). Les teneurs apparaissent aussi faibles dans les résidus de brûlage du plus petit *Burning Ground* du Parc Jeannette (désigné par « Parc Jeannette 1 »), mais présentant un profil classique (∑PCDF >> ∑PCDD et prévalence des TCDF). Il n'existe aucun indice sur ce dernier terrain de démolition d'engins chimiques (mais des indications de brûlage de fusées de projectiles d'artillerie de tranchée). Ce profil est aussi celui des résidus issus de la soute de brûlage du site SIMT à Saint-Martin-de-Crau mais avec des teneurs très nettement plus élevées (335 245,52 ng.kg^{-1} MS pour ∑(PCDD + PCDF)). Ces sites n'ont pas connu le brûlage d'engins et de REG à chargement chimiques.

- **Profils des teneurs des sites de destruction de munitions chimiques**

La grande majorité des résultats analytiques en PCDD et PCDF issus des terrains de destruction de munitions où le brûlage de projectiles chimiques est avéré présente une même typologie (i) des teneurs extrêmement élevées, supérieures à 1 000 ng.kg^{-1} MS (∑(PCDD + PCDF)) avec une signature chimique largement dominée par les PCDF, contribuant à plus de 70% de la teneur en ∑(PCDD + PCDF). Les valeurs de cet indice furanes (∑PCDF / ∑(PCDD + PCDF)) sont dispersées pour les sites Clere & Schwander de Rampont (cf. Figure 358) et de Noire Fontaine (cf. Figure 356), sites en environnement agricoles pour lesquels les sols ont été brassés et homogénéisés par le labour. Lorsque l'on observe ce même indice pour les sites dont les résidus et les sols n'ont pas été remaniés, car abandonnés tels quels en environnement forestier, les signatures sont plus ramassées et moins différenciées. Tel est le cas de la « Place à gaz » (cf. Figure 357), les terrains de brûlage de la *C-Factory* à Trélon et Liessies, et du Bois Brûlé à Conteville (cf. Figure 355). A Trélon le plus grand terrain de brûlage, désigné par « Parc Jeannette 2 » (cf. Figure 359), est celui montrant les teneurs en dioxines et furanes les plus élevées (> 10 000 ng.kg^{-1} MS) portées par plus de 75% par les furanes, alors que les terrains de brûlage dénommé « Parc Jeannette 1 » (cf. Figure 359) et aussi celui du Bois l'Abbé à Liessies sont nettement moins marqués (< 10 000 ng.kg^{-1} MS) et montrent une plus forte proportion en PCDD dans ∑ (PCDD + PCDF), globalement comprise entre 70 et 40%. Ces terrains de brûlage, comme nous allons le voir, se différencient aussi par la nature des matériels détruits par le feu. Les dioxines et furanes en portent la signature.



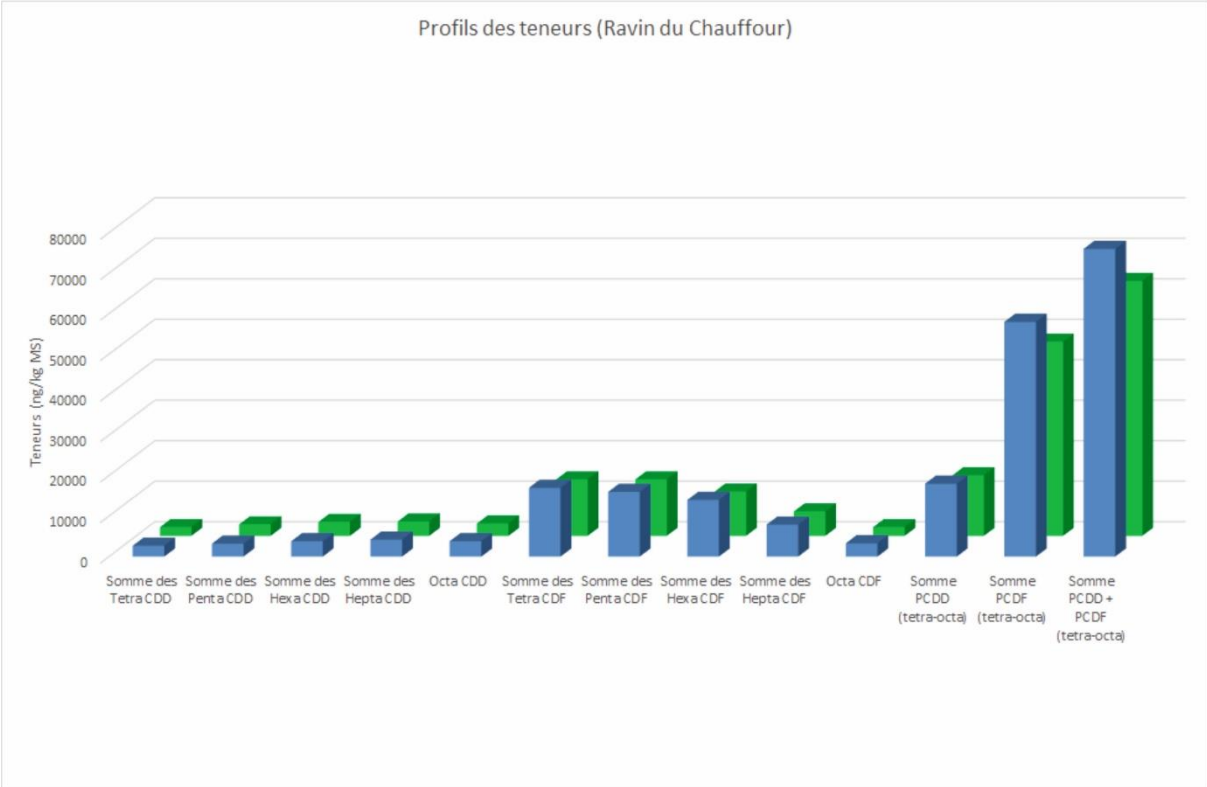


Figure 354 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF des sites SIMT à Saint-Martin-de-Crau (en haut) et du Ravin du Chaufour (Douaumont) (en bas).

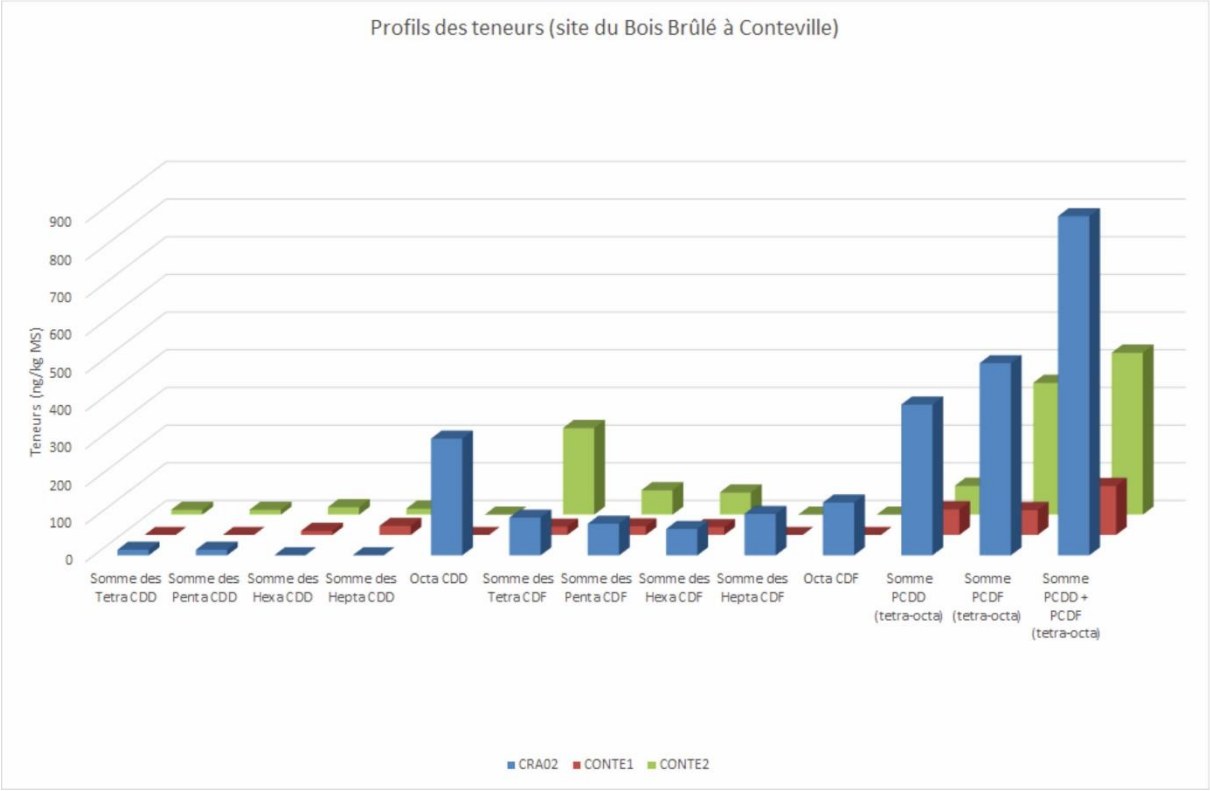
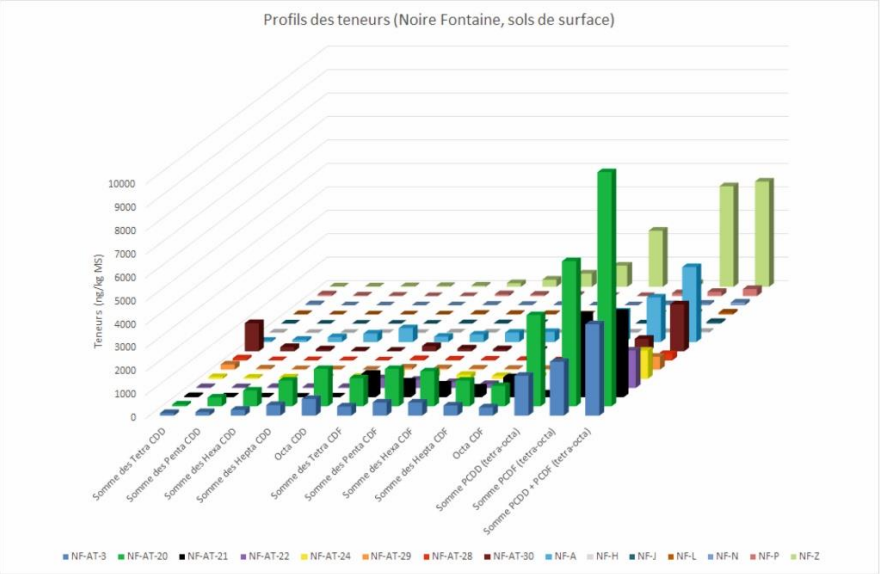
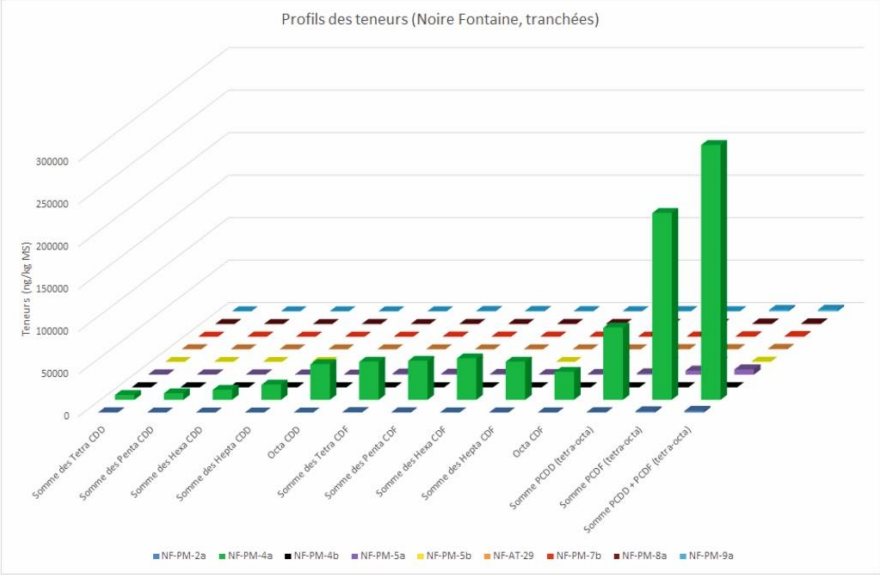


Figure 355 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF des sites B-Factory (F.N. Pickett & Fils) à Westroozebeke (en haut) et du Bois Brûlé (Conteville) (en bas).





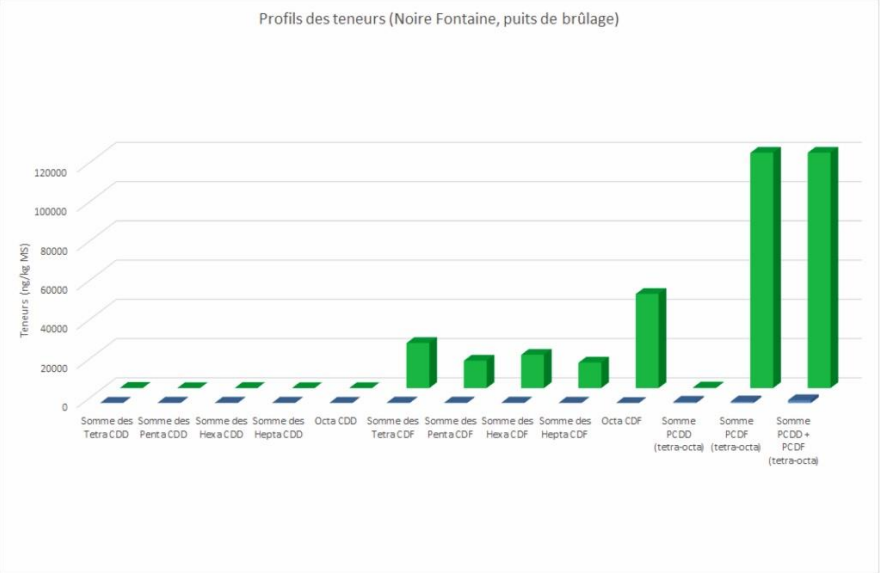


Figure 356 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site de désobusage Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt.

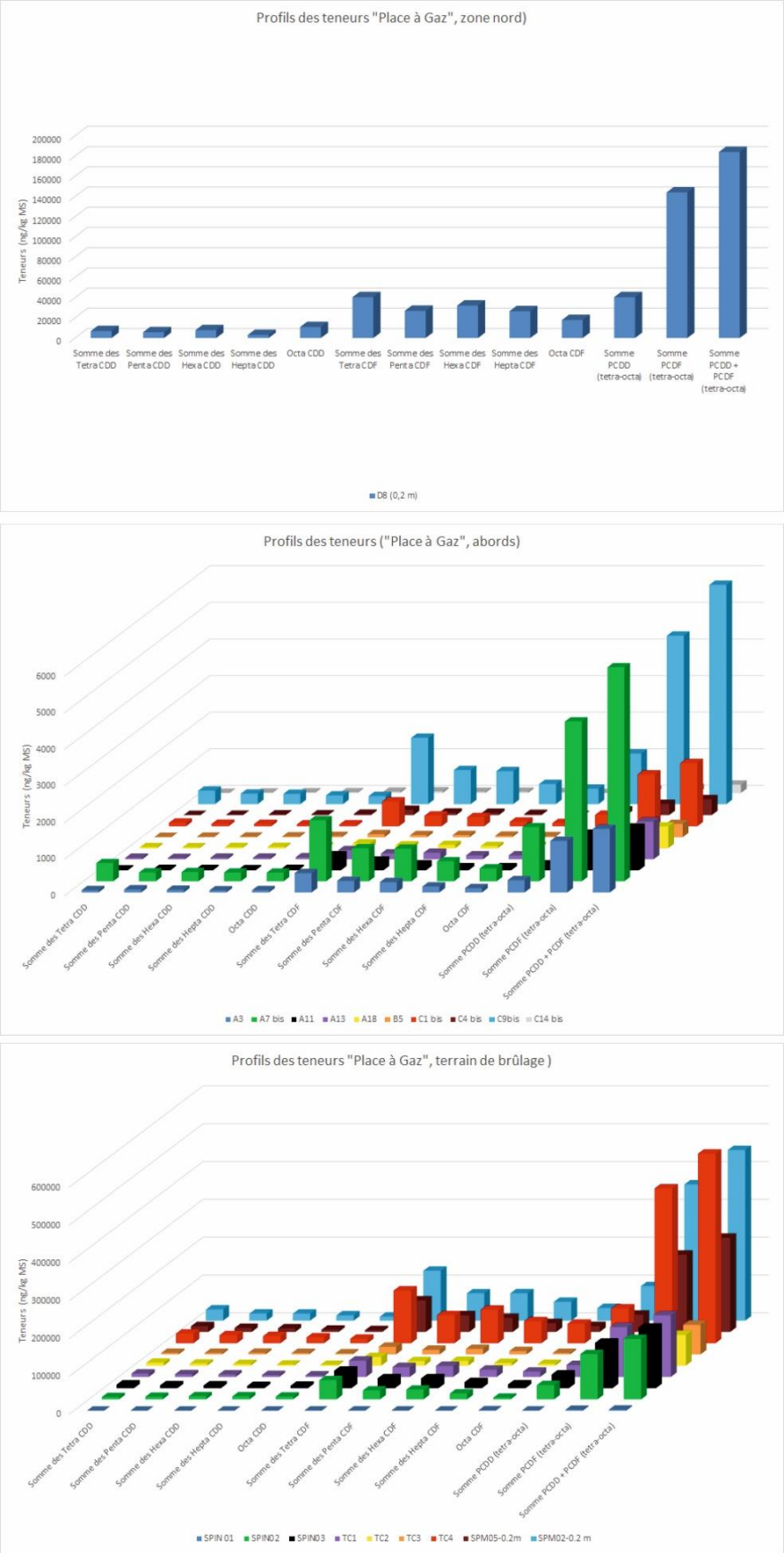


Figure 357 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site de la « Place à gaz » à Gremilly zone nord, en haut, et tache centrale, en bas).

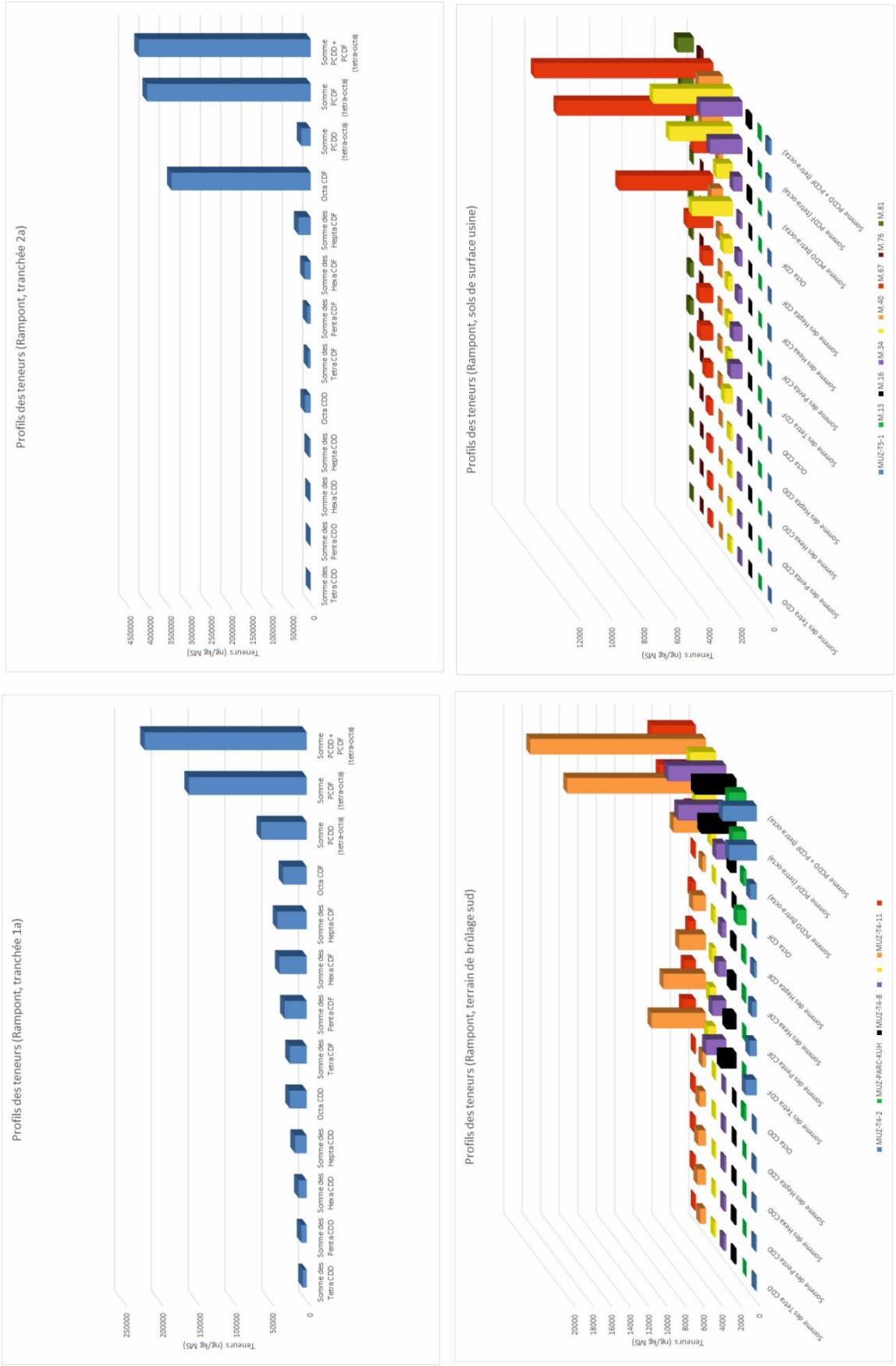


Figure 358 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site Clere & Schwander de Rampont à Muzeray.

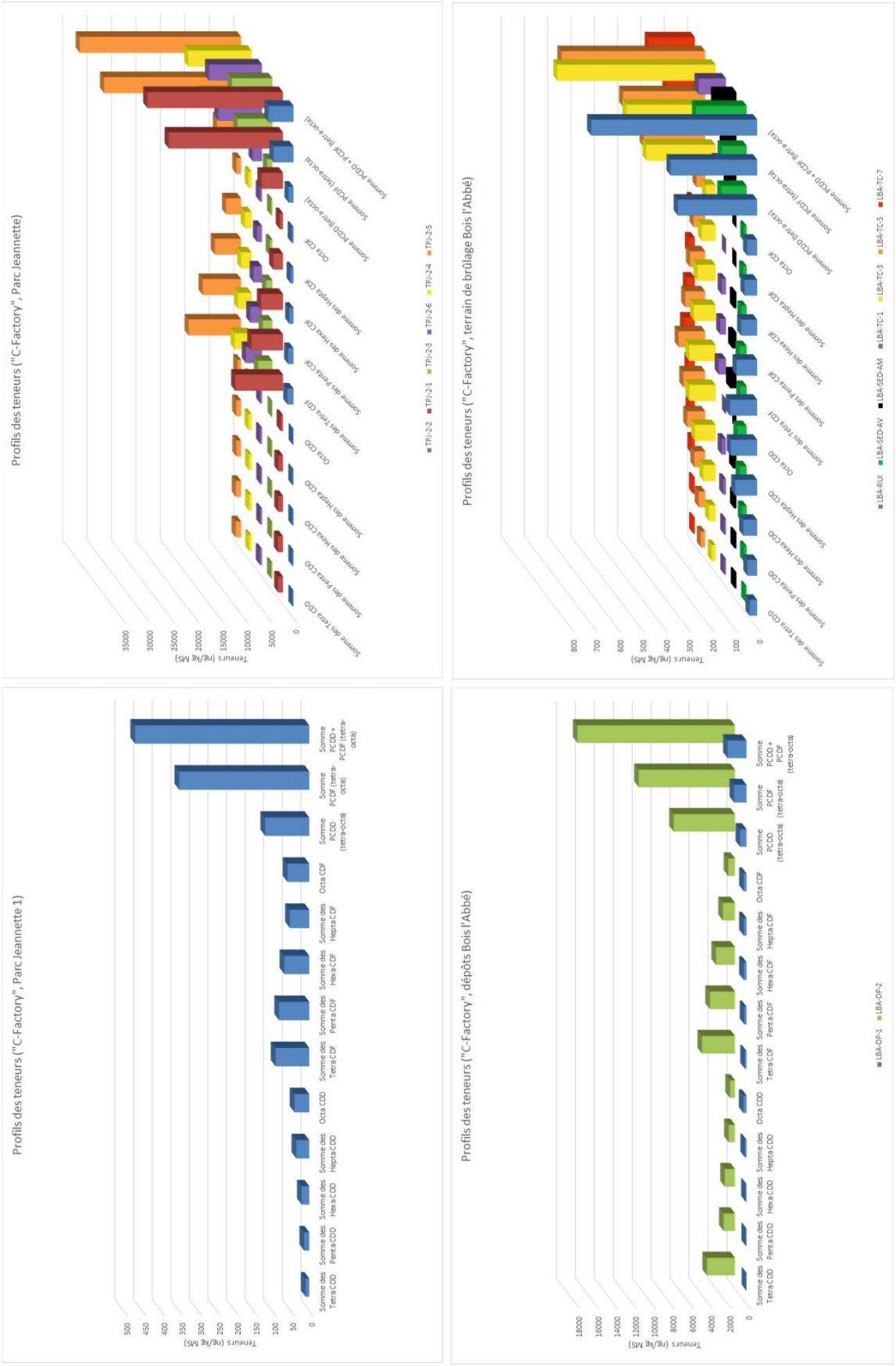


Figure 359 : Profils des teneurs des homologues des PCDD & PCDF du site C-Factory de F.N. Pickett & Fils de Trélon et Liessies.

- **Expression des teneurs en *Toxic Equivalent Quantity* (TEQ)**

Les teneurs en PCDD et PCDF sont fréquemment exprimées dans un système d'équivalence toxique en *Toxic Equivalent Quantity* (TEQ) (OTAN, 1997) pour les rapporter à des effets toxiques, un mode de calcul usuellement pratiqué dans le cadre de l'évaluation des risques en lien avec les pollutions des sols par ces composés. Les 7 congénères de PCDD et les 10 congénères de PCDF ont été retenus par l'OMS pour leur attribuer des facteurs d'équivalence toxique (TEF) permettant d'estimer la quantité de dioxines et furanes avec une métrique unique (OMS, 1998)[1983]. Le système d'Equivalents Toxiques (TEQ) exprime la toxicité relative de chaque composé moins toxique en tant que fraction de la toxicité du TCDD le plus toxique. Chaque composé se voit attribué un « Facteur d'Equivalence Toxique » (FET) (ou TEF pour « *Toxic Equivalent Factor* »). Le TEQ se calcule alors comme suit pour chaque congénère i à la teneur C_i :

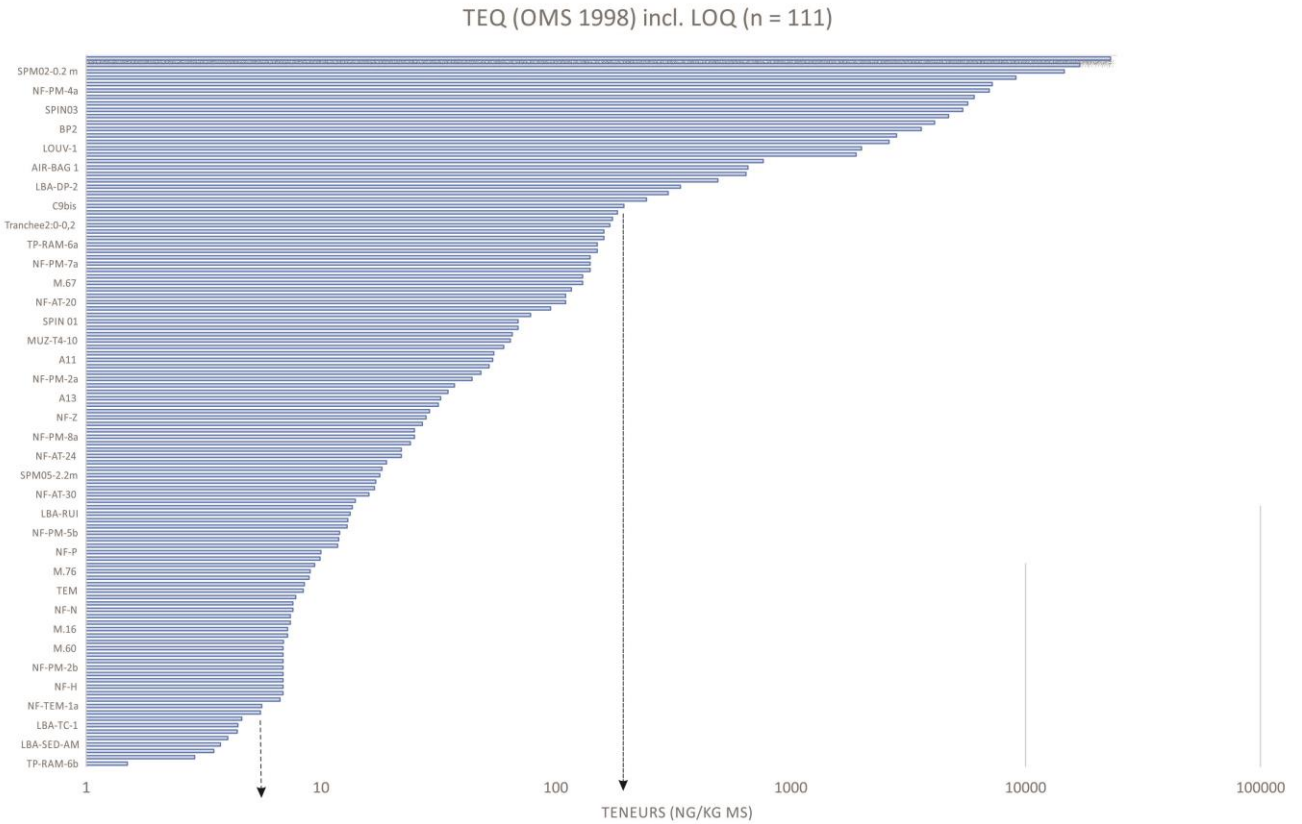
$$TEQ = \Sigma[C_i] \times FET_i$$

Ce coefficient de pondération indique le degré de toxicité par rapport au 2,3,7,8-TCDD, auquel une valeur de référence de 1 a été donné. Les Limites de Quantification (LQ) appliquées par le laboratoire ont été intégrées au calcul des TEQ, considérant les teneurs non quantifiées égales à la LQ. Cet artifice sécuritaire et conservateur (en ce qui concerne les évaluations des risques) explique que le nombre de valeurs considérées et exprimées en TEQ excède celui des valeurs exprimées en teneurs brutes.

Le fond géochimique établit par le BRGM (rapport intitulé « *Bodenan, F. ; Garrido, F. (2004) - Devenir des dioxines dans les sols. Analyse critique de données bibliographiques. Rapport final. BRGM/RP-53070-FR, 66 p* »et « *Bodenan, F. ; Michel. P. ; Cary, L. (2013) - Dioxines/furannes dans les sols français : troisième état des lieux. Analyses 1998-2012. Rapport final. BRGM/RP-63111-FR, 31 p., 4 ann.* » pour des sols ruraux s'établit aux alentours de 1 ng TEQ.kg^{-1} MS (TEQ, OMS, 1998, avec teneurs non détectées = LQ), celui des sols urbains serait aux alentours de 2,6 TEQ.kg^{-1} MS (la médiane a été ici retenue).

On constate sur plus d'une centaine d'échantillons récoltés puis analysés pour les PCDD & PCDF majoritairement dans les sols de surface mais aussi dans les résidus de brûlages des tranchées que trois populations de données se dégagent (cf. Figure 360, TEQ (OMS, 1998)). La première est inférieure à 7 ng TEQ.kg^{-1} MS et s'inscrit dans le fond géochimique des sols urbains et agricoles définis par le BRGM. La seconde population est anomalique et inférieure à 200 ng TEQ.kg^{-1} MS sols mélangés, labourés, enfin 20% sont supérieures à cette valeur s'élevant jusqu'à plus de 10 000 ng TEQ.kg^{-1} MS pour des résidus de brûlage. Les valeurs de teneurs des sols et résidus de brûlage des terrains *Open Burning* exprimées en TEQ, obtenues dans le cadre de la présente recherche n'ont ici rien de comparables, même avec celles relevées dans le proche environnement des incinérateurs réputés émetteurs historiques en dioxines, qui sont du même ordre de grandeur que les teneurs des sols urbains au regard des conclusions du rapport BRGM de 2013. Il s'agit de valeurs extrêmes.

[1983] OMS (1998). *Executive summary : Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the tolerable daily intake (TDI)*. WHO Consultation, May 25-29, 1998, Geneva.



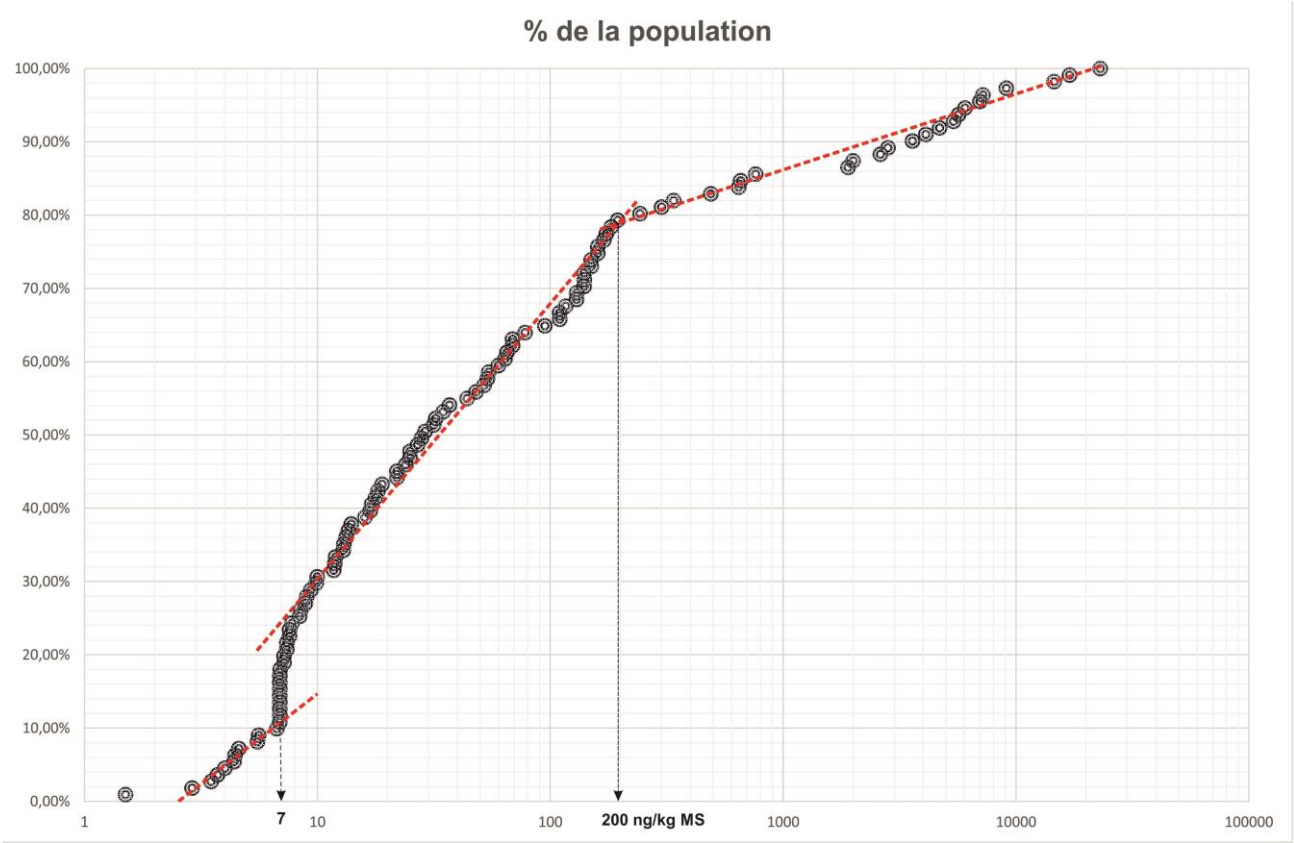


Figure 360 : Distribution de la population des teneurs en dioxines et furanes chlorées exprimées en TEQ (OMS, 1998).

5.5.4 Distribution verticale des teneurs en PCDD & PCDF

Terrain de brûlage de la « Place à gaz » (octobre 2014)

Des profils de teneurs en PCDD & PCDF ont été réalisés sur les sols et résidus de brûlage de deux sondages à la pelle mécanique (dénommés SPM02 et SPM05) effectués au droit du terrain de brûlage de la « Place à gaz » en octobre 2014. Les teneurs totales en dioxines et furanes des échantillons issus des deux sondages, montrent une diminution drastique des teneurs avec la profondeur (cf. Figure 361). Un abattement des teneurs d'un facteur d'environ 300 à 500 est constaté entre les résidus de brûlage prélevés dans les 20 premiers centimètres du terrain (SPM05-0,2) et les sols naturels en place à 60 cm de profondeurs (SPM05-0,6). Cet abattement est de plus de 5 000 dans le cas du sondage SPM02.

Dans les deux cas, cette différence se traduit par une diminution relative des furanes dans le mélange : passant de 82 - 86 % à 55 - 67%. La part des furanes diminue progressivement à l'exception d'un congénère hepta- et de l'OCDF qui augmente (cf. Figure 362). Pourtant, la solubilité des PCDD & PCDF est très faible ($4,7.10^{-4}$ à $6,3.10^{-4}$ mg.L^{-1} pour le congénère le plus soluble (1,2,3,4-TCDD)(ATSDR, 1998)[1984]) et les furanes apparaissent plus solubles et donc potentiellement plus mobiles que les dioxines : $1,93 \times 10^{-2}$ µg.L^{-1} (2,3,7,8- TCDD) contre $4,19 \times 10^{-2}$ µg.L^{-1} (2,3,7,8- TCDF)[1985]. L'hydrosolubilité diminue lorsque le nombre de radicaux chlore augmente au sein des congénères. Les homologues octa-, dont la représentation au sein des teneurs en ∑(PCDD & PCDF) augmente avec la profondeur, sont aussi les moins mobiles car les moins solubles.

PCDD & PCDF sont des composés peu mobiles dans les sols et n'ont que très faiblement pénétré les argiles situées sous les résidus de brûlage de la « Place à gaz », vraisemblablement du fait (i) de leur faible solubilité à l'eau, (ii) du caractère lipophile et hydrophobes de ces composés de structure planaire leur conférant une forte propension à la sorption sur les minéraux argileux, la matière organique et les fractions de charbon de bois renfermés dans les résidus. En effet, le log K_{ow} des PCDD & PCDF est compris entre 5,5 à 12,7 et le coefficient de partage sol-eau Kd est très élevé et s'établit entre $9,55.10^5$ et $4,79.10^7$ L.kg^{-1} pour la 2,3,7,8 TCDD (INERIS, 2006)[1986]. Le Kd, le K_{ow}, l'hydrophobicité des PCDD & PCDF augmentent avec le nombre de radicaux chlore au sein des congénères. La migration différentielle entre PCDD & PCDF dans les terrains naturels au droit des dépôts de résidus de brûlage ne trouve pas, au regard des éléments de connaissance disponibles à ce jour, d'explication.

A noter qu'à plus d'un mètre de profondeur sous les résidus de brûlage, les PCDD & PCDF sont encore quantifiables à des teneurs significativement plus élevées (d'un facteur 17 à 31) que le fond géochimique en environnement rural qualifié par le BRGM[1987]. De tels profils de teneurs ont aussi été identifiés pour les ETM au droit de la « Place à gaz ».

[1984] ATSDR (1998). *Toxicological Profiles for Chlorinated Dibenzo-p-dioxins (CDDs)*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: U.S department of Health and Human Sevices, Public Health Services. http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html.

[1985] Gouvernement du Canada. Fiche descriptive : *Dioxines et furanes*. https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/Contfs.aspx?ID=66&lang=fra

[1986] INERIS (2006). *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Dioxines*.

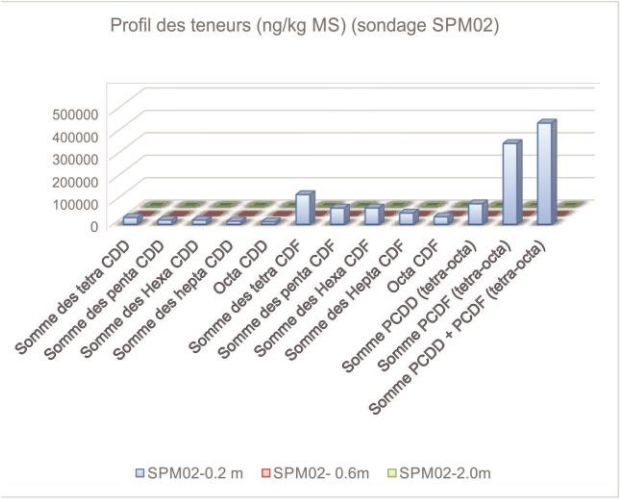
[1987] Bodenan, F.; Garrido, F. (2004). *Devenir des dioxines dans les sols. Analyse critique de données bibliographiques. Rapport final.* BRGM/RP-53070-FR, 66 p »et « Bodenan, F. ; Michel. P. ; Cary, L. (2013) Dioxines/furanes dans les sols français : troisième état des lieux. Analyses 1998-2012. Rapport final. BRGM/RP-63111-FR, 31 p., 4 ann.

Sondage SPM2

SPM02-0.2m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	91100
Somme PCDF (tetra-octa)	360000
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	451000

SPM02-0.6m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	-/-
Somme PCDF (tetra-octa)	77,9
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	77,9

SPM02-2.0m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	-/-
Somme PCDF (tetra-octa)	35,7
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	35,7



Sondage SPM5

SPM05-0.2m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	45500
Somme PCDF (tetra-octa)	204000
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	249000

SPM05-0.6m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	91,8
Somme PCDF (tetra-octa)	626
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	718

SPM05-2.2m	ng / kg MS
Somme PCDD (tetra-octa)	-/-
Somme PCDF (tetra-octa)	115
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	115

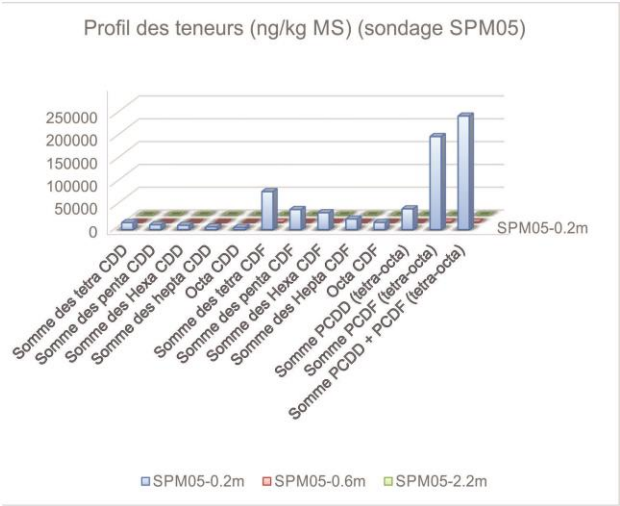


Figure 361 : Teneurs en PCDD & PCDF en fonction de la profondeur (sondage SPM02 et SPM5) au droit du site de la « Place à gaz » à Gremilly (octobre 2014).

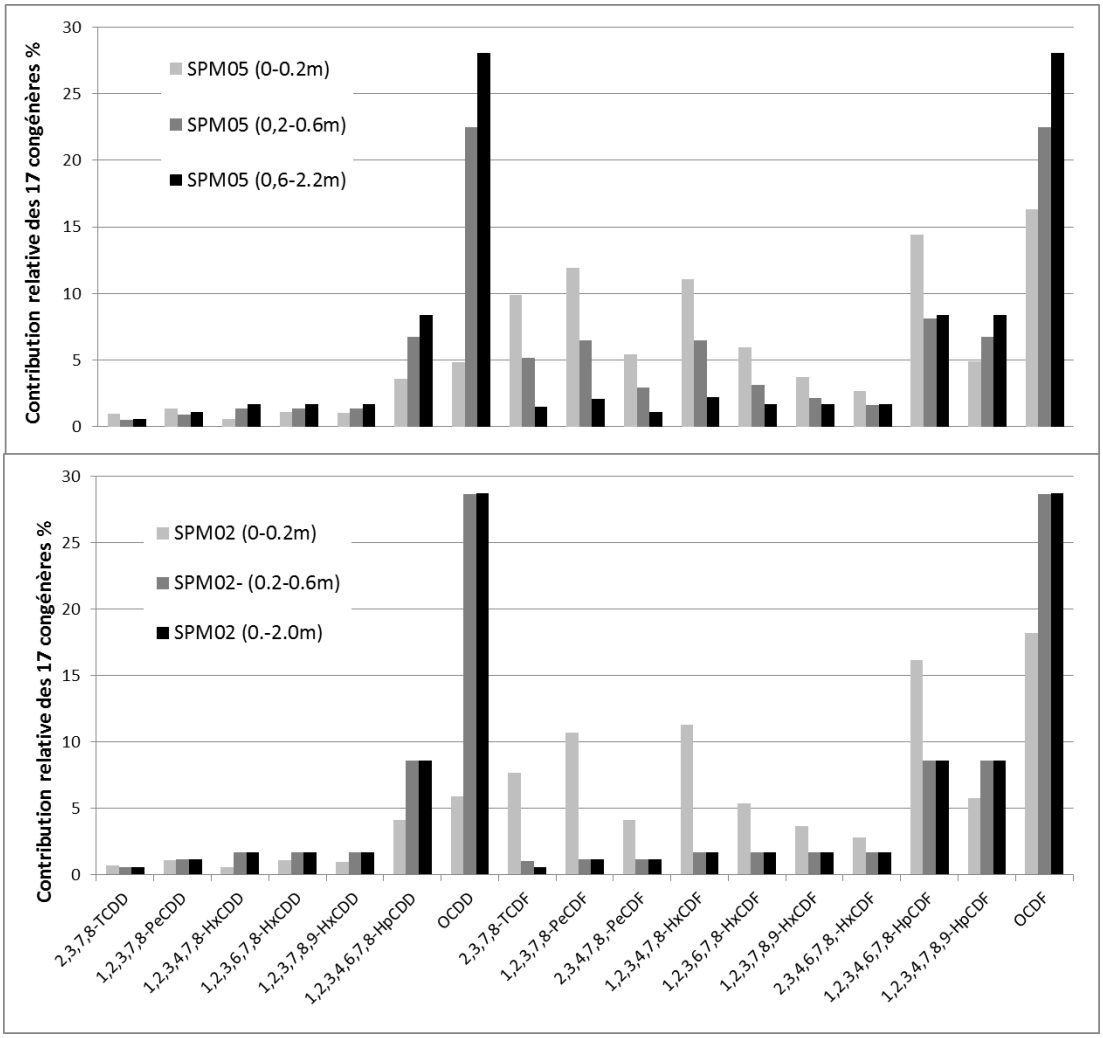


Figure 362 : Evolution des profils dioxines et furanes avec la profondeur pour les deux sondages réalisés au droit de la « Place à gaz » à Gremilly (octobre 2014)[1988].

Terrains de brûlage de Rampont et de Noire Fontaine

Les sondages réalisés au droit des deux ateliers et usines de désobusage Clere & Schwander de Rampont et de Noire Fontaine n'ont pas permis de réaliser systématiquement des profils de sols au droit des résidus et systèmes de tranchées vue la faible épaisseur de terrain meuble surmontant les calcaires bathonien de la Dalle d'Etain (présents entre 1 et 1,5 m de profondeur). Quelques échantillons ont pu être acquis sur une même verticale pour l'analyse au laboratoire des dioxines et furanes, avec des résultats montrant une tendance similaire à celle observée au droit de la « Place à gaz » à savoir une atténuation drastique des teneurs en PCDD & PCDF en quelques dizaines de centimètres (cf. Tableau 66). A Rampont, les teneurs de la partie supérieure d'une tranchée de brûlage sont de l'ordre de 100 fois inférieures à celle des résidus en place et comblant la base de la tranchée. Ce facteur 100 est dans ce cas particulier le taux de dilution des résidus de brûlage initialement présents dans la tranchée avec les sols naturels alentours à la faveur du labour.

[1988] Hubé D., Bâlon P. avec la collaboration de Bodénan F. (2015). *Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55) - Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final.* BRGM/RP-65376-FR, 203 p., 69 fig., 42 tabl., 5 ann.

Bien que les résidus de brûlage et les terrains naturels formant leur assise présentent des caractéristiques physico-chimiques très favorables à la sorption des polluants organiques hydrophobes et des polluants inorganiques (ETM), les masses et teneurs en ces éléments et composés sont si élevées dans les résidus de brûlage que les substrats et leurs sites de sorption saturent et laissent migrer une faction des polluants. Cet effet de saturation des sites de sorption a été démontré par Bausinger (2007)[1989] pour le cas spécifique des arséniates.

Pour autant, ces PCDD & PCDF peuvent être mobilisées vers l'environnement. Les études montrent que ces particules ayant sorbé des PCDD & PCDF peuvent être mobilisée vers les eaux de surface et les sédiments du proche environnement de la « Place à gaz » par ruissellement à la faveur d'épisodes pluvieux.

	Rampont (Muzeray)						Noire Fontaine (Vaudoncourt)		
	Tranchee1a	**Tranchee1b**	**Facteur d'atténuation**	**Dilution par le labour**	**Tranchee2:0-0,2**	**Tranchee2a**	**NF-PM-4a**	**NF-PM-4b**	**Facteur d'atténuation**
	[0,2-0,6m]	[0,6-0,8m]			[0-0,2m]	[0,2-0,7m]	0,3-0,7 m	0,7-0,8 m	
Somme PCDD (tetra-octa)	**62 000**	470	132	110	**2 100**	**230 000**	**85 000**	28	3 036
Somme PCDF (tetra-octa)	**160 000**	1 800	89	111	**36 000**	**4 000 000**	**220 000**	130	1 692
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	**220 000**	2 200	100	111	**38 000**	**4 200 000**	**300 000**	160	1 875
TEQ (OMS 1998) incl. LQ	**4 100**	25	164	135	**170**	**23 000**	**7 000**	9	787

Tableau 66 : Profils de teneurs en PCDD & PCDF au droit de résidus de brûlage des sites de Rampont et de Noire Fontaine.

5.5.5 Résultats PCB *Dioxin-Like* d'un échantillon de résidus de brûlage du site de la « Place à gaz »

Les 12 PCB dits de type PCB-DL sont de plus en plus souvent considérés dans les études « dioxines ». Notamment, les méthodes de calcul du TEQ les plus récentes (OMS, 1998[1990], 2005[1991]) intègrent leur contribution à celles des dioxines et furanes chlorées. Ces molécules sont dosées réglementairement dans les aliments mais beaucoup moins de données existent pour les sols.

Cette contribution peut toutefois être non négligeable, comme cela a par exemple été montré par Pirard et al. (2002)[1992] pour des sols français hors influence industrielle et dans une moindre mesure pour des sols plus impactés, par un ancien incinérateur dans ce cas.

L'analyse faite sur le sol SPIN03 montre une contribution moindre des teneurs en PCB-DL par rapport aux dioxines et furanes (cf. Figure 363). Du fait de facteurs de toxicité moindres pour les PCB-DL que pour les PCDD/F, cela se traduit par une contribution à la toxicité globale TEQ assez faible pour les PCB-DL (2,6% du TEQ total ; cf. Figure 366).

[1989] Bausinger T, Bonnaire E, Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun*, *op. cit.*

[1990] OMS (1998). *Executive summary : Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the tolerable daily intake (TDI), op. cit.*

[1991] Van den Berg, M., Birnbaum L.S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N., Peterson, E.R. (2006). *The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds, Toxicological Sciences*, Volume 93, Issue 2, October 2006, Pages 223–241, https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055.

[1992] Pirard, C., Focant, JF. & De Pauw, E. (2002). *An improved clean-up strategy for simultaneous analysis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), polychlorinated dibenzofurans (PCDF), and polychlorinated biphenyls (PCB) in fatty food samples. Anal Bioanal Chem* 372, 373–381 (2002).

Les valeurs absolues demeurent toutefois élevées :

TEQ PCDD/F (OMS-2005) en ng TEQ.kg^{-1} MS : 4 713
TEQ PCB-dl (OMS-2005) en ng TEQ.kg^{-1} MS : 127.
TEQ (PCDD/F + PCB-DL ; OMS-2005) en ng TEQ.kg^{-1} MS : 4 840.

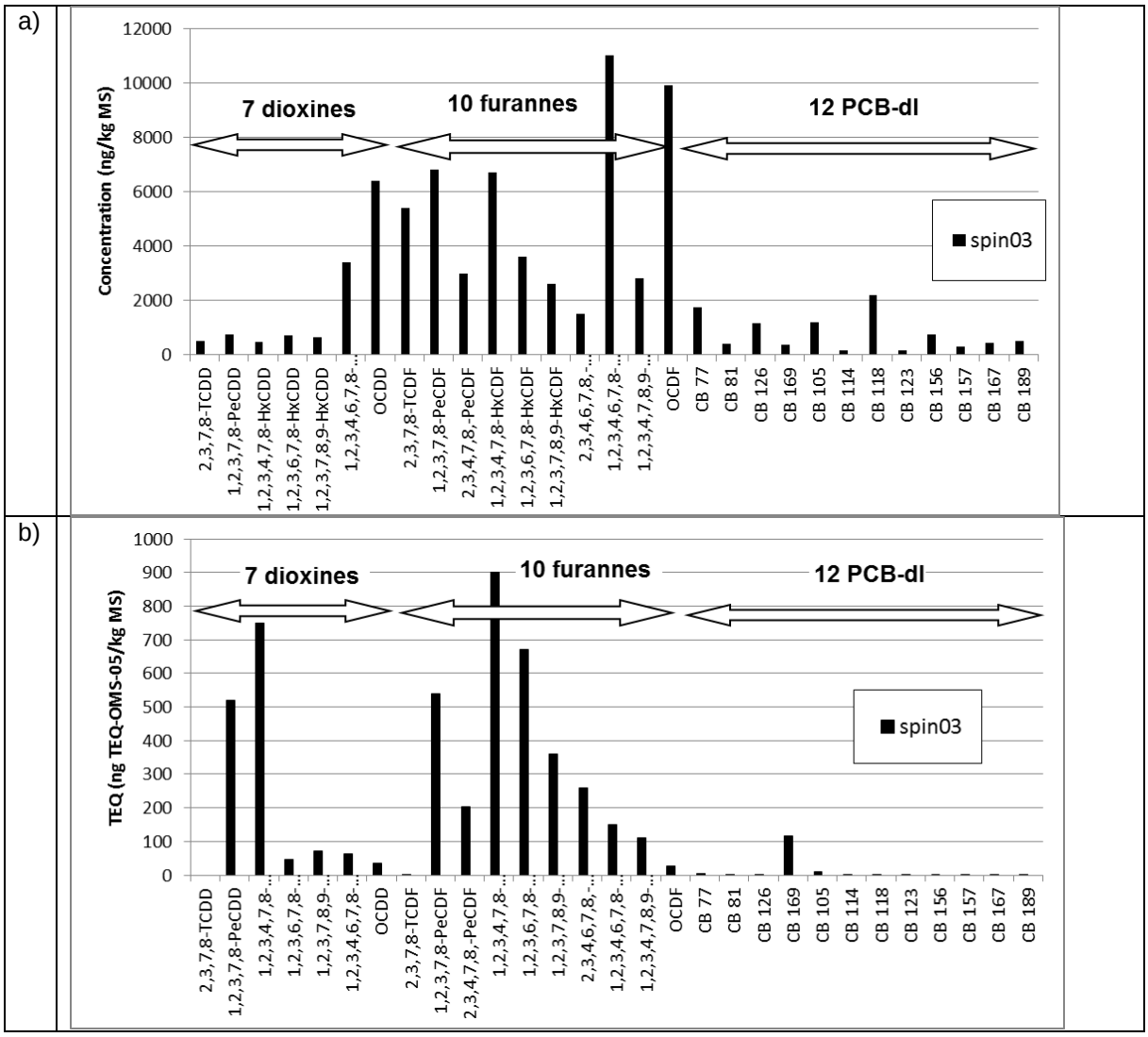


Figure 363 : Contribution relative des PCB-DL du sol SPIN03 a) teneurs, b) toxicité TEQ-OMS 2005[1993].

[1993] Hubé D., Bâlon P. avec la collaboration de Bodénan F. (2015). *Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55) - Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final, op. cit.*

5.5.6 PCDF & PCDD versus As et Zn. Un indicateur discriminant entre brûlage de matériel chimique ou conventionnel ?

Les couples de valeurs (n = 99) de teneurs en ∑(PCDD + PCDF) et en As d'une part et en ∑(PCDD + PCDF) et Zn d'autre part ont été reportés sur les graphiques de la Figure 364 et de la Figure 365 afin d'établir d'éventuelles relations (possibles corrélations linéaires). On constate pour le site de la « Place à gaz », où des obus chimiques allemands à *Croix bleue* (chargés en explosifs et diphénylchlorasines) ont été résolument brûlés à l'air libre, une bonne corrélation entre les teneurs en arsenic et en ∑(PCDD + PCDF), mettant ainsi en exergue que dioxines et furanes et arsenic sont liés sur ce site. On retrouve à proximité du nuage de point de la « Place à gaz » aux fortes teneurs en As et en PCDD & PCDF le terrain de brûlage de la *D-Factory* de Westroozebeke (Poelkapelle) et le plus grand des deux terrains de brûlage de la *C-Factory* à Trélon (Parc Jeannette 2).

Des fioles et/ou des tessons de fioles d'arsine correspondant à différents calibres d'obus à *Croix bleue* ont été collectés sur tous ces terrains.

Les résidus de brûlage allochtones noirs, légèrement moirés, d'aspect gras, riches en tessons de fioles d'arsine identifiés au Bois l'Abbé possèdent une composition en PCDD, PCDF et arsenic qui s'apparente à celle des résidus de brûlage de la tache centrale de la « Place à gaz ».

A noter que certains échantillons s'individualisent par leurs teneurs très élevées en dioxines et furanes et en moindre mesure en As ; il s'agit d'échantillons provenant (i) des systèmes de tranchées de brûlage de Rampont (Clere & Schwander à Muzeray), (ii) des sols au droit des tranchées de brûlage de Noire Fontaine (Clere & Schwander à Vaudoncourt) et (iii) de résidus du dépôt nord de la Place à gaz (F.N. Pickett & Fils à Gremilly).

Pour les autres terrains de brûlage, les teneurs en As restent inférieures à 1 000 mg/ kg MS avec des teneurs variables en ∑(PCDD + PCDF), pour la majorité d'entre elles n'excédant pas 10 000 $ng.kg^{-1}$ MS. C'est le cas en particulier des sols au droit des tranchées de brûlage de Noire Fontaine à Vaudoncourt, de Rampont à Muzeray, de l'aire de brûlage du Bois l'Abbé (*C-Factory* à Liessies), de la plus petite aire de brûlage du Parc Jeannette (*C-Factory* à Trélon). A Noire Fontaine, les teneurs en As des sols sont comprises entre 100 et 1 000 $mg.kg^{-1}$ MS avec des teneurs en ∑(PCDD + PCDF) très dispersées, entre 50 et 10 000 $ng.kg^{-1}$ MS.

Enfin, les résidus de brûlage de munitions conventionnelles de la Seconde Guerre mondiale (Ricome, Ravin du Chaufour) et de munitions explosives modernes (SIMT, Saint-Martin-de-Crau) se détachent nettement du nuage de points de par leurs faibles teneurs en As pour des teneurs très élevées en ∑(PCDD + PCDF).

Les relations entre les teneurs en Zn et en ∑(PCDD + PCDF) (cf. Figure 365) apparaissent encore plus discriminantes pour les différents terrains de brûlage étudiés avec trois ensembles de nuages de points (i) une bonne corrélation linéaire entre le Zn et ∑(PCDD + PCDF) dans le cas du site de brûlage d'obus arséniés de la « Place à gaz », (ii) de faibles teneurs en Zn (<1 000 $mg.kg^{-1}$ MS) et une grande dispersion des teneurs en ∑(PCDD + PCDF) à Rampont et Noire-Fontaine, (iii) des teneurs extrêmes en Zn à teneurs variables en ∑(PCDD + PCDF) pour les trois terrains de brûlage de la *C-Factory* (Trélon et Liessies) et une aire de brûlage de Rampont. La signature chimique Zn / ∑(PCDD + PCDF) des échantillons de ces derniers sites s'approche de celle des résidus de brûlage des projectiles modernes et de la Seconde Guerre mondiale étudiés dans le cadre de cette recherche. Elle se distingue de celle des résidus de la « Place à gaz » par des teneurs en ∑(PCDD + PCDF) plus faibles.

En conclusion, la corrélation linéaire entre les fortes teneurs en As et celles en ∑(PCDD & PCDF) montre que les teneurs en dioxines, furanes chlorées et As sont liées. Ce métalloïde et ces composés trouvent tous leur origine dans l'oxydation thermique (incinération partielle) des toxiques de guerre arséniés (diphénylchlorarsines) renfermés dans certains obus chimiques dits à *Croix bleue*. La structure chimique diphénylée des arsines est proche de celle des PCDD & PCDF et les arsines peuvent être considérées comme un précurseur à la formation des dioxines et furanes chlorées, favorisée par la présence de chlorures. Les terrains de brûlage où ces tendances ont été constatées sont ceux où des projectiles à *Croix bleue* ont été éliminés.

Les terrains de brûlage où des munitions explosives et fusées d'artillerie ont été neutralisés montrent des teneurs en arsenic (< 1 000 $mg.kg^{-1}$ MS) et ∑(PCDD + PCDF) (< 10 000 $ng.kg^{-1}$ MS) moindres, sans corrélation significative, avec une grande dispersion des valeurs des teneurs en ∑(PCDD + PCDF). La dispersion des teneurs est liée pour les sites de Noire Fontaine et de Rampont à la dispersion des résidus de brûlage des tranchées, très concentrés en As, PCDD et PCDF, par le labour et par la réalisation d'échantillonnages dans l'environnement des zones de pollutions concentrées. Les teneurs en As de ces échantillons sont similaires à celles des mesurées dans des résidus de grillage et de brûlage de munitions explosives de la Seconde Guerre mondiale et modernes.

Les teneurs très élevées en Zn, sans corrélation avec les teneurs en ∑(PCDD + PCDF) signent des opérations de brûlage de fusées d'artillerie allemandes. L'association de teneurs très élevées en Zn et en Hg (du fulminate de mercure des amorces renfermées dans les fusées) soutient cette hypothèse. Les échantillons des résidus de brûlage de la « Place à gaz » montrent des teneurs en Zn du même ordre de grandeur mais des teneurs significativement plus élevées en ∑(PCDD + PCDF). On peut donc en déduire que si le chargement chimique d'obus à arsines allemands a bien été détruit par brûlage (à l'origine des PCDD, PCDF et des teneurs extrêmes en arsenic) sur ce site, des fusées d'artillerie y ont aussi été neutralisées. Cette déduction des analyses chimiques converge avec les observations de terrain et la découverte parmi les résidus de brûlage de nombreux fragments de fusées d'artillerie allemande en alliage Al/Zn/Cu, et, pour nombre d'entre elles, fendues en deux (caffûts). Les brûlages étaient toujours opérés sur engins exempts de leurs fusées (munitions désamorcées). Les fusées auraient été brûlées, dissociés de leur obus, soit dans le même foyer que les projectiles, soit lors d'opérations spécifiques mais avec le même système de tranchées de brûlage. Cette mixité se retrouve aussi sur la plus grande aire de brûlage de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Trélon (Parc Jeannette 2).

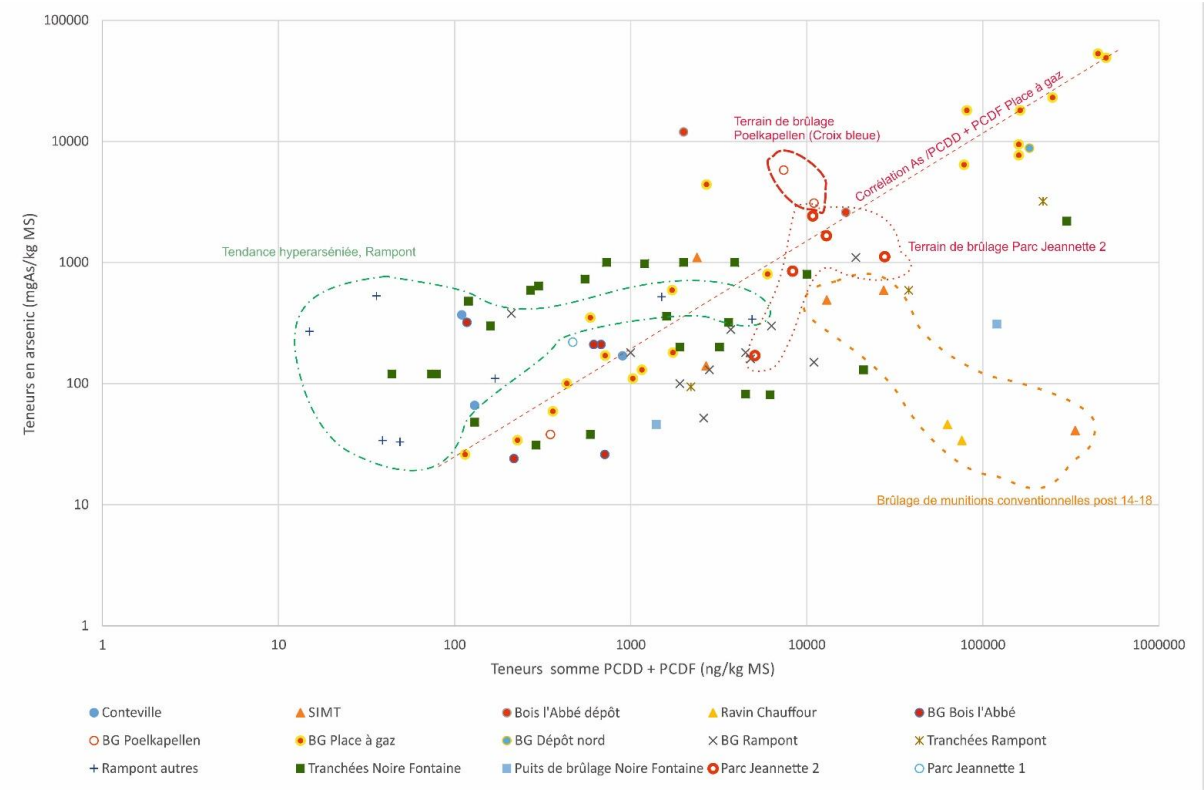


Figure 364 : Teneurs en arsenic versus teneurs en ∑(PCDD + PCDF) (terrains et tranchées de brûlage) (n = 99).

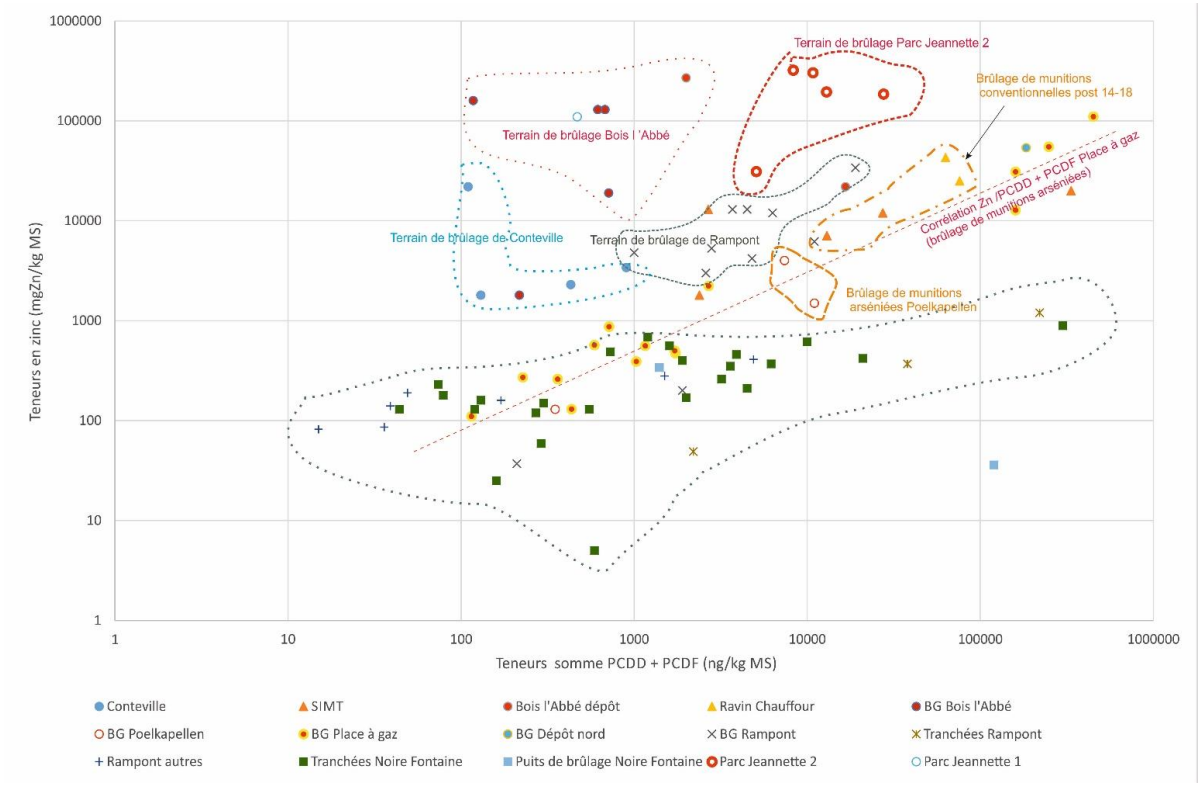


Figure 365 : Teneurs en zinc versus teneurs en ∑(PCDD + PCDF) (terrains et tranchées de brûlage) (n = 94).

5.5.7 PCDD & PCDF. Des géoindicateurs des conditions de brûlage

Comme cela a été décrit dans ce qui précède, des observations de terrain attestent que des munitions ont été neutralisées par OB sur les terrains investigués.

Les fioles d'arsines découvertes sur les *Burning Grounds* étaient vides, parfois partiellement emplies d'un résidu goudronneux, gras et noirâtre. Des fioles partiellement fondues et déformées plastiquement, et des pastilles de verre vert issues de fioles totalement fondues ont aussi été récoltées sur le site de la « Place à gaz », à Westroozebeke, ou encore à Noire Fontaine. Seule la contrainte thermique à haute température (> 600 °C) est en mesure de déformer ainsi le verre (au-delà du point de ramollissement). Ces éléments en verre vert sont parfois associés à des fragments charbonneux centimétriques et infra millimétriques comme démontré par Thouin (2016) par imagerie microscopique[1994]. L'état du verre indique que la température du foyer atteignit, temporairement et/ou ponctuellement, des températures au moins équivalentes à celle de la fusion du verre (> 1 500 °C).

Les analyses chimiques sur les échantillons de résidus de brûlage apportent d'autres preuves de phénomènes de combustion de matériels de guerre arséniés, chlorés et hydrocarbonés. Les sols fortement arséniés et les résidus cendreux, scoriacés, formant des couches de 2 à 70 cm sur les sols naturels à la « Place à gaz », à Trélon, Liessies, Rampont et Noire Fontaine montrent la présence de composés organo-arséniés bien particuliers : la triphénylarsine (TFA) et un cortège complexe et rare d'hydrocarbures aromatiques polycycliques arséniés (As-HAP) dont le 9-phenylfluorène (PAF) et le Biphényl-4-yl diphénylarsine, pour le reste difficile à identifier et à quantifier. D'autres mesures et analyses sur des échantillons issus du terrain de la « Place à gaz » attestent de la présence au sein des résidus noirâtres d'autres As-HAP[1995] (phénylarsafluorène, (biphényl-3-yl)diphénylarsine, (biphényl-4-yl)diphénylarsine, (biphényl-2-yl)diphénylarsine, ainsi que de particules charbonneuses possédant une structure interne de charbon de bois. Il s'agit typiquement de composés néoformés par les recombinaisons moléculaires lors de la combustion incomplète des arsines.

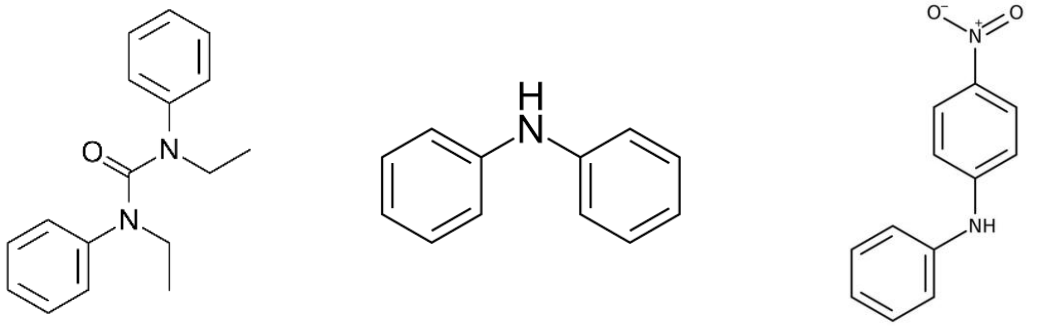
Par ailleurs, des teneurs extrêmes en PCDD & PCDF (dioxines et furanes chlorées, jusqu'à 4 000 000 $ng.kg^{-1}$ MS pour ∑(PCDD + PCDF) ont été mesurées dans les résidus de brûlage. Ces composés se forment tout au long du processus de combustion essentiellement entre 400 - 650°C[1996] en présence de chlorures et de composés aromatiques (comme les diphényls) et plus généralement hydrocarbonés. Au-delà de 600°C, correspondant peu ou prou à la température de ramollissement du verre, les cinétiques de destruction des PCDD & PCDF par pyrolyse dépassent celles de la formation de ces composés (cf. Figure 366). La structure chimique des dioxines et furanes chlorées est très proches de celle des arsines (structure diphényl). Les chlorures et cyanures de diphénylarsine seraient des précurseurs primaires des dioxines et furanes chlorées au même titre que les PCB (l'incendie de transformateurs aux PCB ayant été largement étudié comme pourvoyeur de dioxines dans l'environnement).

Une autre famille de substances présente dans les REG possède des structures chimiques diphénylées proches des PCDD & PCDF (cf. Figure 366): les stabilisants des ergols solides à base de nitrocellulose, comme la *Centralite* (1,3-diethyl-1,3-diphenylurée), la diphénylamine ou encore les isomères des nitrodiphénylamines.

[1994] Thouin, H. (2016). Thèse présentée par Hugues Thouin, *op. cit.*

[1995] Bausinger, T., Preuss, J. (2011) *Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunition im Wald von Spincourt (Frankreich), op. cit.*

[1996] Jansson, S. (2008). *Thermal Formation and Chlorination of Dioxins and Dioxin-Like Compounds*. *Doctoral Dissertation.Umeå University*. Department of Chemistry.



Centralite (1,3-diethyl-1,3-diphenylurée) *Diphénylamine (DPA)* *4-nitrodiphénylamine*

Figure 366 : Formules structurales de stabilisants des ergols solides nitrocellulosiques (Centralite, diphénylamine et 4-nitrodiphénylamine).

La destruction des poudres propulsives par brûlage peut être donc aussi potentiellement pourvoyeuse de dioxines et furanes. Les teneurs très élevées dans les résidus de grillage du Ravin du Chaufour à Douaumont pourraient être liées à la combustion des cartouches d'obus de 20 mm chargées en ergols solides nitrocellulosiques stabilisés. Les poudres étaient stabilisées par des composés nitrophénylurée. Des stabilisants et plastifiants modernes ont pu être à l'origine, par leur décomposition thermique, des fortes teneurs constatées au droit des deux points de brûlage du site SIMT dans les Bouches-du-Rhône. Le chlore aurait pu être présent par la combustion de matières plastiques courantes comme le PVC (*PolyVinyl Chlorid*). Mais à la différence des autres sites de brûlage significativement marqués par les PCDD & PCDF, ces résidus sont peu ou pas arséniés. Des expériences de pyrolyse de composés organochlorés au laboratoire ont montré qu'en présence de précurseur primaires de structure diphényl, comme les PCB, les réactions de synthèse des PCDD &PCDF étaient rapides (en deux ou trois étapes) et que la signature des composés polychlorodibenzo qui en résulte était dominée par les PCDF. Cette signature est celle majoritairement observée sur les terrains de brûlage d'obus arséniés ex-allemands à *Croix bleue* en France et en Belgique.

L'occurrence dans les terrains visés par cette recherche de cortèges complexes faits d'arsenic inorganique, d'espèces organo-arséniées et de molécules polyaromatiques polychlorées organiques (PCDD & PCDF) est doublement indicatrice (i) de processus thermiques de brûlage à basses et hautes températures et (ii) portant sur des composés, munitions et chargements organiques, arséniés et chlorés.

De récentes recherches dans le domaine des conditions de formation des dioxines et furanes montrent que la présence de précurseurs diphénylés, comme les PCB et les chlorodiphénylarsines, n'est pas nécessairement requise pour que ces molécules soient générées. Ces PCDD & PCDF peuvent aussi se former par cyclisation de composés hydrocarbonés en présence de chlore. La présence de composés dont la structure est basée sur des cycles benzéniques, comme les chlorobenzènes mais aussi tous les NAC (mono-, di-cycliques) seraient par ailleurs aussi favorables à la formation des PCDD & PCDF car la cyclisation est déjà opérée. Cette synthèse dite « Do Novo » (combinaison du carbone, de l'oxygène et du chlore) serait facilitée par l'occurrence de certains métaux, comme le cuivre[1997].

[1997] Jansson, S. (2008). *Thermal Formation and Chlorination of Dioxins and Dioxin-Like Compounds, op. cit.*

La signature des sols sur des sites ayant connu la pyrolyse de composés comme les chlorobenzènes et les NAC est différente de celle impliquant des précurseurs biphénylés ; elle se singularise dominée par la présence à parts égales de PCDD et de PCDF[1998]. Ces signatures sont observées sur les terrains de brûlage du Bois l'Abbé, de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils à Liessies, du Bois Brûlé (usine F.N. Pickett & Fils de Conteville) pour lesquels il n'existe aucun indice environnemental et aucune indication historique de destruction d'engins chimiques.

Les différents états du verre observés sur les restes de fioles d'arsines, les conditions de formation des PCDD & PCDF rapportées dans la littérature scientifique et la persistance de composés organo-arséniés dérivés de la recombinaison de radicaux réactifs lors de la décomposition thermique partielle des arsines forment un faisceau d'indications que les foyers de brûlage de REG connurent de forts contrastes de température, au moins dans une gamme de 300 à 1 500°C (cf. Figure 367).

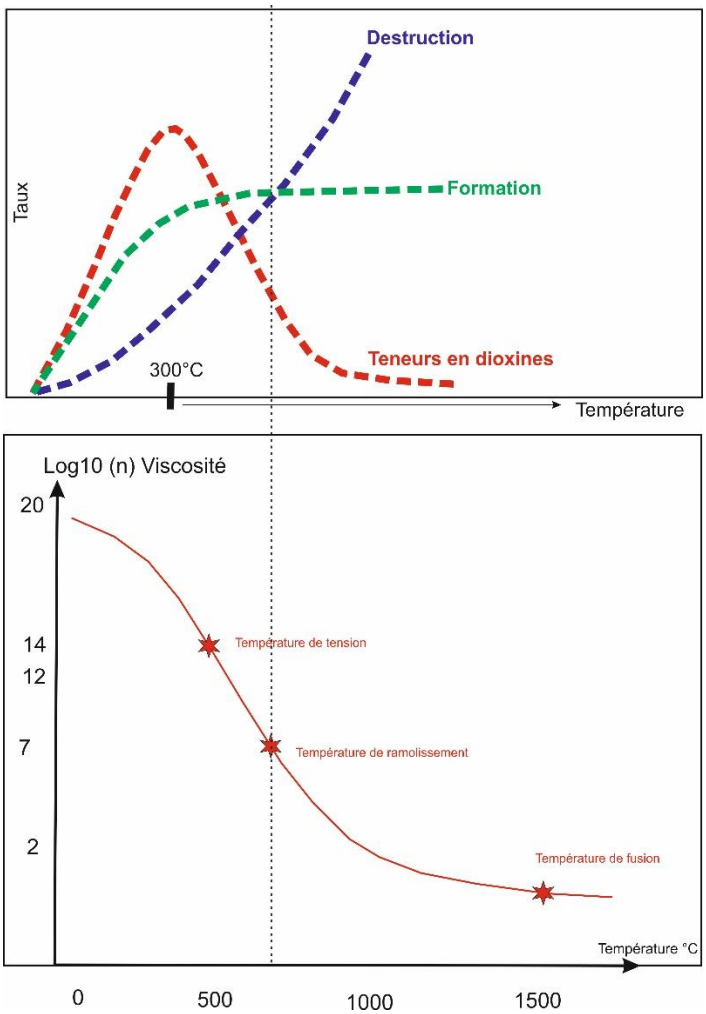


Figure 367 : Formation des PCDD & PCDF en fonction de la température et courbe de fusion du verre.[1999]

[1998] Hutzinger, O. Ghulam Ghaus Choudhry, G. Chittim, B.G., Johnston, L.E. (1985). *Formation of Polychiorinated Dibenzofurans and Dioxins during Combustion, Electrical Equipment Fires and PCB Incineration. Environmental Health Perspectives.* Vol. 60, pp. 3-9, 1985.

[1999] D'après Wehrmeier, A., Lenoir, D., Sidhu, S.S., Taylor, P.H., Rubey, W.A., Kettrup, A., Dellinger, B. (1998). *Role of copper species in chlorination and condensation reactions of acetylene. Environmental Science & Technology* (32) 2741-2748, cité dans Jansson, S. (2008). *Thermal Formation and Chlorination of Dioxins and Dioxin-Like Compounds*. Umeå University. Department of Chemistry. 2008.

Les conditions de formation des teneurs extrêmes en PCDD & PCDF doivent être appréciées à présent au regard des différentes phases des séquences de brûlage et être mises en perspectives des très rares témoignages historiques décrivant ces opérations. Lors de l'élévation de la température du foyer, pour atteindre le point de ramollissement du verre (vers 600-700 °C), les PCDD & PCDF formées aux basses températures (vers 350-400 °C) se décomposent, se pyrolysent. Les taux de destruction de ces molécules croissent avec la température et dépassent les taux de formation. Plus la température augmente, jusqu'à atteindre le point de fusion du verre (vers 1 500 °C), plus le taux de pyrolyse des dioxines augmente (cf. Figure 367).

A noter ici que la dépollution thermique in-situ est l'une des solutions de traitement des sols et matériaux hautement pollués par les dioxines et autres composés organochlorés lourds et complexes.

Le cheminement inverse, la chute de la température une fois le foyer en cours d'extinction, est bien plus favorable à la production de dioxines et furanes car les molécules générées ne sont pas détruites et peuvent être émises vers l'environnement et s'accumuler dans les résidus à la faveur de mécanismes de sorption. Les archives attestent de conditions de brûlage non contrôlées favorables à la formation des dioxines et furanes. Les foyers, une fois allumés de nuit, étaient désertés par le personnel pour des raisons de sécurité. Au sein de la maison Pickett, pour laquelle de rares archives existent sur les pratiques de brûlage, les inspecteurs des munitions retournaient sur les lieux ce brûlage le lendemain, bien après allumage, pour constater le rendement des brûlages, inventorier les imbrûlés. Les écrits de Michael Kostevitch au sujet du brûlage en tranchée et à l'air libre d'obus chimiques ex-allemands à *Croix bleue* ne laissent persister aucun doute sur le fait que la combustion au sein des foyers de brûlage était imparfaite et laissait, une fois le foyer éteint des explosifs, matières et matériels toxiques partiellement décomposés qu'il fallait reprendre pour un nouveau brûlage jusqu'à complétude de leur vidage et neutralisation.

> *Le brûlage n'excède pas deux heures, mais personne ne devait approcher l'aire de brûlage avant la reprise du travail le lendemain. Le lendemain matin, les représentant du « "Empty Shells Inspection Department" doivent, après s'être équipe de gants spéciaux, masques, etc. être certains que le contenu de chaque obus a été détruit par le feu et que l'obus est vide. Dans le cas contraire, ou qu'une fiole n'ait pas été brisée, ces derniers serait à reboucher et réservés pour la prochaine opération de brûlage pour le jour suivant.*
>
> *Après que tous les obus vides ont été retirés, les tranchées doivent être méticuleusement nettoyées, et les explosifs non brûlés, s'il y en a (ce qui est extrêmement rare), collectés et placés dans des caisses en bois détruites le lendemain matin sur une aire de brûlage.*
>
> *Le gaz contenu dans les obus à « Croix bleue » de 210 mm est contenu dans un réservoir en tôle cannelée*[2000]*. En conséquence du gaz peut subsister après le premier brûlage. Pour être certain de sa complète dissipation, l'obus à gaz en question doit être soumis à un processus spécial de brûlage qui doit être répété huit fois.*
>
> *Le procédé consiste, après la première combustion, à boucher de façon lâche les obus dans la tranchée. Pour ces aires de brûlage spéciales, les obus à Croix bleue de 210 mm doivent être placés de part et d'autre de bombes allemandes de 250 mm de sorte que la chaleur dégagée par le feu et les mines chauffe le contenu des obus chimiques*[2001]».

[2000] Il s'agit du plus gros obus chimique de la Grande Guerre.

[2001] Kostevitch, M. (1926). *Burning out filled projectiles*, *op. cit*. Kostevitch, M. (1927). *H. E. & P. : Burning ground*. Paris. Patent GB212357*, op. cit.*

Ces extraits de documents d'archive montrent clairement que la combustion des foyers de brûlage était incomplète car laissée libre à elle et sans surveillance (sans être éventuellement entretenue) durant la nuit. D'autres archives le laisse sous-entendre comme cet extrait, cocasse.

> « *On s'est lancé un grand défi en brûlant et vidant les obus chimiques allemands, en particulier ceux contenant de l'arsenic. Le toxique allemand sternutatoire ne pouvait être éliminé que de cette sorte. Toutefois, la combustion n'était pas toujours complète. Un des tours favoris du contremaître du chantier de brûlage est de faire tomber l'intensité du feu, juste avant l'arrivée de visiteurs, afin qu'ils aient une petite expérience de ce à quoi ressemble l'"arsenic gas". Un des "gentlemen" qui a inspecté notre usine de Belgique, sur injonction de la Cour, dans l'intention d'un procès, s'est tellement approché des obus en combustion qu'il s'est mis à éternuer à un tel point que sa fausse dent a sauté de sa bouche dans le brasier et a lentement disparu*[2002] ».

Au-delà de la défiance du personnel de chez F.N. Pickett & Fils de Westroozebeke à l'encontre des autorités en charge de l'inspection et du contrôle des chantiers de désobusage qui transparait clairement au travers de cet écrit, c'est bien le caractère incomplet de la combustion des obus à *Croix bleue*, connu des techniciens de l'entreprise, qui se confirme ici.

La montée en température du foyer se traduisit en théorie par la destruction des dioxines et furanes. La retombée de la température, en présence de matières toxiques résiduelles, fut possiblement un épisode paroxystique de production de dioxines et furanes. Les foyers de brûlage étaient non contrôlés ; de forts gradients de température et une hétérogénéité des conditions de température (présence de forts gradients) étaient vraisemblablement favorables à l'émission des dioxines & furanes tout le long du processus de combustion. Cette production de PCDD & PCDF lors du refroidissement était une conséquence directe de la combustion partielle des chargements d'arsine, laissant aux basses températures, un excès d'hydrocarbures aromatiques et de chlore.

La présente recherche montre que d'autres chargements chimiques et explosifs subirent de telles séquences de brûlage, dans des opérations possiblement aussi pourvoyeuses de PCDD & PCDF. La combustion d'*Ypérite,* un hydrocarbure sulfuré chloré et son solvant, le monochlorobenzène, aromatique, pourraient aussi être à l'origine de PCDD & PCDF.

Les conditions de la formation des homologues octa-chlorés (OCDD, OCDF), marquant certains échantillons de résidus de brûlage analysés (fosse de Noire Fontaine (OCDD). Rampont et Bois l'Abbé (OCDF)) peuvent être discutées. Ces échantillons proviennent de terrains de brûlage ou la calcination d'obus chimiques, notamment à Croix bleue, est avérée. La décomposition d'une mole de chlorodiphényarsine ($C_{12}H_{10}AsCl$, M = 264,5 g.mol^{-1}), libère une mole de chlorure (Cl^-) ; quatre moles d'arsine sont donc nécessaires pour générer une mole de tétrachlorodibenzofuranes (TCDF, $C_{12}H_4Cl_4O$, M = 306 g.mol^{-1}), et huit moles pour produire une mole d'octachlorodibenzofuranes (OCDF, M = 444 g. mol^{-1}). Les espèces octa-chlorées se formeraient donc préférentiellement en présence de chlore en excès. Ce chlore peut être apporté par les arsines, mais aussi d'autres sources riches en chlore comme les *Ypérites* (dichlorées) et/ou des agents fumigènes inorganiques trichlorés et tétrachlorés avec respectivement $AsCl_3$ et $SnCl_4$.

[2002] *Anonym : Man who "cleaned-up" France : how shells and poison gas were rendered harmless. The Daily Graphic vom 26.07.1923.*

La présence de thianes (1,2,5-trithiépane, 1-oxa-4,5-dithiépane) et de fortes teneurs en monochlorobenzène (jusqu'à 12,8 mgMCB / kg MS) dans les résidus de brûlage de la fosse de Noire Fontaine témoigne de l'influence possibles des *Ypérites* au soufre dans l'apport d'atomes de chlore pour la formation des dioxines et furanes hautement chlorées. Les agents fumigènes cités dans ce qui précèdent étaient souvent mélangés aux *Ypérites*.

6. Résumé et conclusions de la Section 3e

***Open Burning* et *Burning Grounds*. Pratiques et terrains de brûlage de Restes Explosifs de Guerre**

Open Burning (brûlage à l'air libre) est une méthode de déchargement de projectiles et de neutralisation des matières et matériels explosibles et agressifs (Restes Explosifs de Guerre (REG)). Elle est basée sur le principe de la différence de comportement au feu des *casings* et éléments métalliques, incombustibles, à récupérer une fois déchargés, et des chargement organiques ou organométalliques, combustibles. Elle fut opérée sur des engins, matériels de guerre ne pouvant être déchargés en toute sécurité dans un but profitable par d'autre procédés (comme la fusion à l'eau chaude), dans une perspective de récupération des vieux métaux. C'était le cas notamment des projectiles chimiques ex-allemands à *Croix jaune* à *Ypérite* (qui avait tendance à se figer dans les *casings*) et à *Croix bleue* chargés d'arsines solides prises dans une matrice d'explosifs et des engins explosifs non déchargeables par ailleurs dont se plaignait F.N. Pickett.

Différents designs de terrains de brûlage (*Burning Grounds*) et séquences de brûlage furent imaginés et mis en œuvre pour parvenir à ces fins. M Kostevitch, ingénieur - artilleur russe au sein de l'entreprise F.N. Pickett & Fils développa un principe de spécificité : démolir et brûler les munitions selon des protocoles adaptés et spécifiques à chaque type d'engin. Ces lignes directrices furent possiblement adoptées au sein de F.N. Pickett & Fils et au-delà, si on considère que le Ministère de la Guerre finit par les imposer aux autres entreprises mandatées par l'Etat pour démolir les REG héritées de la Grande Guerre. Trois types de terrains de brûlage furent identifiés par les reconnaissances de terrain en France comme en Belgique (i) les tranchées / rangées de brûlage hors sol, bordées par des rails de chemin de fer, merlons, et/ou des murs d'obus vidés (*Burning Trenches*), (ii) des tranchées peu profondes ouvertes dans le sol et éventuellement sommairement aménagées (*Burning Trenches*) et (iii) des fosses et puits de brûlage peu profonds (*Burning Pits*). Lorsque la neutralisation par le feu s'effectua dans des fours, on parle plutôt de grillage (*Rosting*) comme cela fut fréquemment pratiqué pour les fusées d'artillerie (*fuses*) et les munitions d'armes portatives (*Small Arms Ammunition, SAA*). Les foyers étaient entretenus par du bois, dont la combustion était initiée et boostée par un saupoudrage de poudres propulsives ou encore des boues issues du déchargement d'engins explosifs. A noter que des terrains et fosses de brûlage (de reprise) auraient été spécialement exploités à proximité des *Burning Grounds* principaux pour neutraliser en appoint et finition des matériels et matières (comme les fioles d'arsines) partiellement décomposés lors des séquences de brûlages.

Burning grounds **étudiés et les résidus de brûlage**

Ces opérations de brûlage sur des tonnages importants (plusieurs milliers de tonnes) laissèrent des résidus de brûlage (déchets de combustion). Les terrains de brûlage où de tels résidus ont été identifiés, observés et caractérisés, avec des résultats exploités dans le cadre de cette recherche sont ceux (i) du site F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » (Gremilly, département de la Meuse), (ii) du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander (sites de Noire Fontaine et Rampont, canton de Spincourt, département de la Meuse), (iii) de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Trélon (Parc Jeannette) et Liessies (Bois l'Abbé)) (département du Nord), (iiii) de la *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Westroozebeke, Flandre occidentale, Belgique), (iiiii) du Bois Brûlé (Conteville, département de la Somme), (iiiiii) de la *E-Factory* de F.N. Pickett & Fils d'Audruicq (département du Pas-de-Calais) et (iiiiiii) Zweedorf (Mecklembourg-Poméranie, Allemagne), soit environ 13 *Burning Grounds*.

Ces résidus apparaissent comme des matériaux granulaires, hétérogènes, d'un faciès cendreux à scoriacé, parfois d'aspect gras, noir et moiré, ou encore gris à vert olive lorsqu'ils renferment de grandes quantités de fragments de fusées (alliage Al/Zn/Cu oxydé). Pelliculaires (quelques centimètres d'épaisseur), ces résidus peuvent aussi former une couche de plusieurs dizaines de centimètres de puissance. Les reconnaissances de terrain, montrent que ces résidus pourraient se subdiviser en deux catégories (i) des résidus autochtones, déposés au droit des *Burning Grounds* où ils ont été générés et (ii) les dépôts de résidus allochtones, lorsqu'ils ont été déplacés et déposés à proximité des *Burning Grounds* où ils ont été calcinés. Ces derniers dépôts pourraient aussi possiblement correspondre à des brûlages de finition.

Pollutions imprimées dans les sols : un autre livre d'histoire

Les archives documentent de façon précise et générique les méthodes et moyens de destruction des Restes Explosifs de Guerre (REG) par brûlage dans l'entre-deux-guerres, mais sont avares en informations sur la nature et la conduite opérationnelle des brûlages, et en particulier sur la typologie, les quantités d'engins neutralisés, à l'échelle de chaque terrain de brûlage (*Burning Ground*).

La caractérisation de la nature, de la localisation et de la position, de l'état physique des éléments anthropiques et/ou d'origine pyrotechniques présents au droit des *Burning Ground* et/ou au sein des résidus de brûlage, ainsi que de la composition des cortèges d'éléments chimiques et de molécules organiques (en teneurs absolues et relatives) constituant ces matériaux, permettent par interprétation et déduction d'éclairer la connaissance des faits et pratiques de destruction de REG par brûlage de l'entre-deux-guerres. D'importants efforts analytiques furent consentis pour explorer la composition de ces résidus atypiques, considérant dans un premier temps les connaissances historiques sur la composition des matériels et matières de guerre et le comportement environnemental des éléments et substances organiques en question.

Cette recherche aux interfaces entre géosciences, histoire des sciences et techniques et histoire militaire, met en exergue l'intérêt de la démarche de caractérisation approfondie, chimique et pyrotechnique, des pollutions historiques et des résidus de brûlage générés par les opérations de dénaturation des REG, non seulement comme source de connaissance pour alimenter les évaluations des risques sanitaires et environnementaux actuels, mais aussi comme source indirecte et originale de connaissances des pratiques historiques sur les sites de brûlage là où les archives font défaut. L'interprétation de ces géoindicateurs et l'expertise pyrotechnique complètent pertinemment les informations délivrées par les sources d'archives classiques.

Des teneurs élevées à la fois en arsenic inorganique, en composés organo-arséniés dérivés des diphénylarsines, associés à des tessons en verre vert de fioles d'arsines vomitives témoignent de neutralisation d'obus allemands à *Croix bleue*. La présence concomitante de monochlorobenzène et de thianes résulte de la présence d'*Ypérites* au soufre allemandes tandis que le cortège constitué par le brome lixiviable, les composés bromés monoaromatiques et les dioxines et furanes bromées (PBDD & PBDF) est symptomatique de la présence dans les sols de restes d'agents lacrymogènes bromés (comme le *T-Stoff* allemand) et leurs sous-produits dérivés. La destruction de fusées d'artillerie allemandes est attestée par la présence dans les sols et les résidus par de fortes teneurs en zinc (Zn) bien corrélées au cadmium (Cd) et en moindre mesure au cuivre (Cu) et au mercure (Hg). Enfin, l'étain (Sn) est également présent à des teneurs anomaliques, localement très élevées (> 6 $g.kg^{-1}$ MS), dont l'occurrence pourrait s'expliquer par le déchargement d'engins de guerre à charge fumigène ($SnCl_4$ ou « Liqueur de Libavius ») ou de munitions à l'intrados étamé. Ce métal est aussi associé à de fortes teneurs en arsenic (As) (ce métalloïde a aussi été utilisé sous forme $AsCl_3$ comme agent fumigène dans des munitions à chargement chimique).

La chimie de certains résidus de brûlage présente des caractéristiques de calcination à la fois de projectiles chimiques et de fusées d'artillerie ex-allemandes typiques de la fin de la guerre. Pourtant, les brûlages d'obus étaient toujours pratiqués sur engins au préalable désamorcés et ouverts à l'œil (ogive) ou au culot, c'est-à-dire dépourvus de leurs fusées / gaines détonateurs. Ces terrains auraient donc pu être exploités avec des séquences de brûlage spécifiques aux obus, d'autres visant spécifiquement les fusées.

Enfin, le terrain de brûlage d'Audruicq (*E-Factory* de F.N. Pickett & Fils) correspond vraisemblablement à une catégorie particulière de *Burning Grounds*, sur lesquels aucun projectile, qu'il soit conventionnel ou chimique, n'aurait été brûlé compte tenu de l'absence de pollution métallique. Seules des traces d'explosifs y ont été détectées et quantifiées. Ce terrain accueillait vraisemblablement des brûlages de poudres (ergols), poudres noires, explosifs et boues issues des installations de vidage par fusion à l'eau chaude. Celle d'Audruicq était la plus vaste de toutes celles des usines F.N. Pickett & Fils en France et en Belgique. Par ailleurs Pickett n'y déchargea que des munitions britanniques.

Dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF) et bromées (PBDD & PBDF) et dérivés organo-arséniés. Témoins actuels et persistants de pratiques de brûlage anciennes

La particularité des résidus est leurs teneurs systématiquement anomaliques (bien supérieures au fond géochimique en environnement rural identifié par le BRGM (2013) en dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF, PolyChloroDibenzo-p-Dioxines & PolyChloroDibenzoFuranes), localement (fosse nord-est de la « Place à gaz ») en dioxines et furanes bromées (PolyBromoDibenzo-p-Dioxines & PolyBromoDibenzoFuranes). Les teneurs se sont révélées localement extrêmes (> 4 000 000 $ng.kg^{-1}$ MS (∑PCDD + PCDF)). Des composés organo-arséniés « exotiques » d'une grande diversité appartenant aux familles polyphénylées (di- et tri-phényls) et aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques arséniés (As-HAP) ont été mis en évidence dans ces résidus par des recherches originales et parfois quantifiés dans des résidus très marqués par l'arsenic.

Ces molécules n'ont jamais été intentionnellement synthétisées par l'industrie chimique; il s'agit de substances résultant de recombinaisons moléculaires de radicaux réactifs produits à partir de molécules mères hydrocarbonées en présence de chlore et/ou d'arsenic lors de phénomènes de combustion à basse température (combustion incomplète).

Les PCDD &PCDF se forment ainsi majoritairement vers 450°C. Ces substances ont été mesurées à fortes teneurs en particulier dans des résidus renfermant (i) des fioles intactes vidées de leurs arsines contenant des résidus noirs goudronneux, (ii) des fioles déformées et partiellement fondues et (iii) des billes et galettes de verre vert totalement fondues. Il s'agit d'indication que ce verre a été porté au moins à sa température de ramollissement (~ 600°C), voire au-delà, jusqu'à sa température de fusion (> 1 500 °C). Le chargement des obus à *Croix bleue* ayant contenu ces fioles d'arsines fut donc soumis à un processus thermique dans des foyers au sein desquels régnaient de forts contrastes et gradients de température ce que semblent corroborer les rares documents d'archives décrivant les opérations de brûlage de ces engins : les foyers étaient allumés le soir puis laissés actifs sans surveillance durant la nuit, une fois le personnel ayant pris congés. Le lendemain, les inspections des munitions triaient les engins, séparant ceux totalement calcinés et déchargés, de ceux partiellement vidés et devant être repris par une nouvelle séquence de brûlage. PCDD, PBDD, PCDF, PBDF et PCB *Dioxin-Like* devaient se former durant toutes les étapes des séquences de brûlage, depuis la montée en température jusqu'à l'extinction et au refroidissement, mais leur production devait culminer durant la phase de refroidissement, lorsque les foyers atteignaient une température inférieure à celle de la pyrolyse et de la destruction des dioxines et furanes. Cette émission aurait été rendue possible par l'excès de chlorures, de diphénylarsines en excès, dans les brasiers durant toutes la séquence de brûlage. Les chlorures de diphénylarsines (*Clark 1*) possèdent (i) une structure chimique très proche des PCDD & PCDF (correspondant à des groupements biphénylés oxydés), et (ii) des atomes de chlore. Les arsines constituent ainsi des précurseurs à la formation par pyrolyse imparfaite des dioxines et furanes. Les stabilisants des ergols solides nitrocellulosiques, comme les diphénylamines, possèdent aussi une structure chimique proche des PCDD & PCDF. Les deux sites de brûlage de munitions de la Seconde Guerre mondiale, d'ergols, et de matériels pyrotechniques contemporains ne s'écartent pas, en ce qui concerne les profils des teneurs en PCDD & PCDF, de ceux d'engins de 1914-1918. Enfin, d'autres molécules, plus simples, à moindre poids moléculaire, (comme le monochlorobenzène, les NAC, ou encore les sulfure d'éthyl dichlorées, ou *Ypérite*) ont pu être, en présence de chlore ou de brome, à l'origine de dioxines et furanes halogénées. La présence dans les sols naturels au contact des résidus de brûlage d'horizons rubéfiés (rouge brique), teintés par les oxydes de fer, constitue une autre indication des fortes températures auxquelles furent portés les sols et les résidus.

On constate sur la presque centaine d'échantillons analysés pour le dosage des PCDD & PCDF, une signature (rapport entre les teneurs en homologues) généralement dominée par les furanes (∑PCDF > ∑PCDD, ∑PCDF / (∑(PCDD + PCDF) > 70%) avec une prévalence des congénères bassement chlorés (TétraChloroDibenzoFuranes, TCDF), avec toutefois, sur certains *Burning Grounds* des signatures singulières par des teneurs émergentes en congénères hautement chlorés (OCDF et OCDD), nécessitant pour leur formation un excès d'atomes de chlore. L'hypothèse du brûlage de chargement chimique et fumigène peut être avancée.

Résidus de brûlage majoritairement marqués par des teneurs extrêmes en Eléments Traces Métalliques (ETM)

Les résidus de brûlage sont principalement marqués par les Eléments Traces Métalliques (ETM) avec des teneurs rarement rencontrées sur des sites et sols pollués: l'arsenic (As) sur les sites de destruction de munitions à arsines, le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et en moindre mesure le cadmium (Cd), le mercure (Hg) sur les *Burning Grounds* dédiés aux fusées d'artillerie, le plomb (Pb), l'étain (Sn). Elles excèdent le $g.kg^{-1}$ MS voire 100 $g.kg^{-1}$ MS pour As et Zn. Ces teneurs sont liées à la présence dans les résidus de fragments métalliques millimétriques, d'une fraction sorbée sur les éléments constitutifs des résidus et de minéraux arséniés néoformés.

Les NAC et leurs sous-produits de transformation environnementale tout comme les sous-produits organo-arséniés n'ont été détectés qu'à l'état de traces (< mgNAC.kg^{-1} MS). Ces composés organiques et organométalliques des chargements des munitions ont été majoritairement détruits par le brûlage comme escompté. D'une manière générale, les résidus d'explosifs nitroaromatiques détectés dans les résidus de combustion et dans les sols au droit et aux abords des *Burning Grounds* possèdent une signature chimique dominée par le TNT, les DNT, les DNB, et leurs sous-produits de transformation environnementale, qui reflètent aussi la nature des chargements explosifs, en particulier ex-allemands.

Les teneurs en PCDD & PCDF proches ou égales au mg.kg^{-1} MS, au moins 1 000 fois inférieures à celles des ETM, sont pourtant exceptionnelles et rarement reportées dans la littérature scientifique.

Les métaux et métalloïdes libérés depuis les *casings* des obus et leur chargement, et des fusées brûlées sur les mêmes sites se recombinèrent sous forme de phases minérales amorphes ou cristallisées néoformées. L'As des arsines totalement décomposées (en As, H_2O, CO_2, HCl) s'oxyda et s'exprima sous forme d'arséniate (AsO_4^{3-}) de fer (issu des *casings* et/ou du milieu naturel), de Cu, de Zn (issus des fusées) dans les résidus avec des habitus minéralogiques hérités des phases de montée et de descente des températures.

Des polluants des résidus de brûlage peu ou pas mobiles

Les métaux, métalloïdes, PCDD & PCDFs présents à des teneurs exceptionnellement très élevées dans les résidus de brûlage montrent une mobilité environnementale pourtant très faible du fait (i) de la très faible hydrosolubilité des molécules organiques polyaromatiques de haut poids moléculaire et des oxydes métalliques, (ii) du caractère planaire des composés aromatiques (Kd et K_{oc} très élevés) et (iii) de la capacité de sorption très élevée des résidus de brûlage liée à leur composition, riche en oxyhydroxydes de fer, et en éléments charbonneux granulaires finement dispersés. Cette particularité explique les écarts très importants constatés entre les résultats analytiques des teneurs sur des extraits après lixiviation à l'eau (sur des échantillons composites d'un à deux kilogrammes) et celles après l'extraction aux solvants organiques, sur un aliquote de quelques grammes. Une mobilité de certains polluants (PCDD, PBDD, PCDF, PBDF, Zn) vers les eaux de surface et leurs sédiments a été constatée dans l'environnement de certains *Burning Grounds*. Elle est due à des entrainements mécaniques par ruissellement de particules de sols et résidus, sur lesquelles les polluants sont sorbés, à la faveur d'épisodes de fortes pluviométrie.

Pollutions et phytotoxicités spectaculaires

Les pollutions des sites de brûlage de munitions de l'entre-deux-guerres étudiés dans le cadre de cette recherche peuvent s'avérer spectaculaires par l'effet des polluants sur la végétation. Le site de la « Place à gaz » en forêt de Spincourt forme une clairière de 1 000 m^2, avec une surface noircie sur laquelle rien ne pousse. L'endroit était connu au moins dès les années 40 comme ayant été l'emplacement de la destruction des munitions chimiques « à gaz » allemandes de la Grande Guerre. Rarement pollutions des sols sont si visibles. L'endroit a cristallisé sur lui, jusque dans les années 2010, toute la question laissée ouverte de la séquelle environnementale de la Grande Guerre.

<u>En environnement forestier</u>, là où les résidus de brûlage ont été abandonnés tels quels, les teneurs extrêmes en ETM se traduisent par l'absence de couvert végétal au niveau des zones de pollution les plus concentrées ; latéralement, les teneurs diminuant, la végétation colonise ces surfaces par des association d'espèces tolérantes, résistantes, qui se distribuent concentriquement selon les gradients des teneurs. Ce couvert reste d'une faible biodiversité.

Les bryophytes (mousses) et lichens sont les plantes colonisant les matériaux les plus pollués, s'agissant de plantes rustiques d'une grande plasticité écologique, tirant leurs subsistances et nutriments de l'air et des aérosols. Elles sont accompagnées aux teneurs décroissantes par des graminées. Les sondages à la pelle mécanique réalisés au droit du site de la « Place à gaz » montrent que la surface de ce *Burning Ground* ne peut être qualifié de sol au sens pédologique du terme, car constitué de matériaux totalement anthropiques, s'assimilant à une couche de déchets dangereux générés par des procédés industriels d'éradication par brûlage de Restes Explosifs de Guerre.

En environnement agricole, les teneurs en ETM des sols de surface sont moindres du fait de phénomènes de dilution et de dispersion des masses de polluants par le brassage sur [0-40 cm] des résidus avec les sols naturels à la faveur des labours. Le taux de dilution entre résidus et sols brassés est de 100 au droit de tranchées de brûlage à Rampont. Ces teneurs sont encore suffisamment élevées pour jouer négativement par leur phytotoxicité sur la croissance et le développement des plants (orge, maïs, etc.). Un transfert sélectif des sols vers les épis d'orge a aussi été démontré à Noire Fontaine (ADPA, TNT) et pour Pb des sols vers des champignons à la « Place à gaz ».

Open Burning. Sources de pollutions sévères, rares, locales et circonscrites des sols de surface ?

Les sites de destruction de munitions par *Open Burning (Burning Grounds, Burning Trenches* et *Burning Pits)* sont d'extension très limitée (quelques centaines de m^2) et vraisemblablement peu nombreux comparativement aux sites de démolition par *Open Detonation* (plus de 70% des sites de destruction de REG identifiés, avec des terrains de démolition parfois étendus sur quelques hectares) au regard de l'inventaire historique dressé par le BRGM (2018) et des archives consultées dans le cadre de cette recherche. Les pollutions des sols associés, visibles, sont certes spectaculaires, mais concernent de rares sites. Se pose ici alors la question légitime de la représentativité des caractérisations des résidus et pollutions, des principales interprétations qui en découlent et des conclusions avancées, eu égard à celles de l'ensemble des sites de brûlage de l'entre-deux-guerres. Faute de connaître le nombre réel de sites d'OB de l'entre-deux-guerres et leur typologie, le degré de représentativité des éléments présentés dans ce qui précède ne peut être évalué mais peut être discuté. D'autres sites de brûlage ont été identifiés à la faveur des recherches historiques menées afin d'établir l'inventaire BRGM (2018). Ces sites, étant actuellement au sein d'emprises militaires, ne sont pas directement accessibles. D'autres, sur terrains civils, n'ont pas fait l'objet de reconnaissances, faute de temps et de moyens.

La majorité des *Burning Grounds* identifiés et caractérisés visait des matériels ex-allemands caractéristiques de la fin de la guerre. Ces munitions furent rassemblées dans l'immédiate sortie de guerre par les Services de la Récupération pour être démolies en priorité. Les archives démontrent que parmi ces engins, nombre d'entre eux ne pouvaient être déchargés en toute sécurité et de façon profitable par des concessionnaires du Ministère de la Guerre ou du Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks que par brûlage. L'hypothèse selon laquelle les *Burning Grounds* seraient avant tout une spécificité liée à la neutralisation des engins ex-allemands et que les éléments avancés dans cette recherche possèdent une dimension représentative semble plausible.

Les pollutions associées aux opérations d'*Open Burning* sont peu ou pas mobiles et impactent peu le milieu aquatique.

Néanmoins, ces zones exposant en surface des teneurs très élevées, voire extrêmes, de polluants toxiques, CMR, persistants, peuvent constituer des milieux d'exposition directe et/ou indirecte, et nuire au libre usage des sols, agricoles comme forestiers. La découverte fortuite de pollutions sévères des sols agricoles en 2015, en lien avec les installations historiques de désobusage industriel Clere & Schwander, enclencha, dans un contexte socio-politique tendu, la réalisation de diagnostics des sols, des eaux et denrées alimentaires, pour en évaluer les risques. Ces spécificités distinguent ces sites pollués des terrains d'explosion où les zones de pollution concentrées se situent en profondeur, à la base d'entonnoirs d'éclatement généralement remblayés par des matériaux peu ou pas pollués. Les résidus d'explosifs générés par OD sont plus mobiles que ceux par OB, car plus solubles et moins facilement sorbés sur les fractions minérales et organiques formant les matrices solides des sols. Les opérations d'OB sont avant tout génératrices de pollutions locales et sévères des sols de surface, peu mobiles, par les ETM et sous-produits de décomposition thermique partielle des constituants organiques et organométalliques des REG typiques de la fin de la guerre, alors que les démolitions de REG par OD peuvent potentiellement être à l'origine de zones de pollution concentrée par les constituants des poudres et explosifs pouvant préférentiellement affecter les eaux souterraines.

Le nettoyage des anciens champs de bataille, des vastes dépôts de surplus de guerre, a pollué les sols. Quelques mois auront suffi à des industriels pour décharger, en urgence et par nécessité, par recherche du profit, des milliers de tonnes de munitions anciennes et neutraliser les matières explosibles et agressives par l'usage du feu (brûlage). Ces Restes Explosifs de Guerre entravaient les libres reconstructions agricoles, industrielles et domestiques. Cette histoire polluante de la sortie de guerre semble avoir échappé à l'historiographie de la Grande Guerre et de l'immédiate sortie de guerre, pourtant, elle fut incontournable, inévitable, extra-ordinaire pour pourvoir restaurer un temps et des espaces pacifiés ordinaires. Les pollutions des sols, locales mais sévères, extrêmes, générées par ces opérations inédites du temps de paix, pour en finir avec les restes hérités du temps de guerre, sont à présent centenaires. Si certains historiens de la conflictualité questionnent si oui ou non la Grande Guerre va disparaitre de nos mémoires[2003], ces pollutions, inchangées depuis leur formation, persisteront encore sur de longues périodes de temps, des durées sans aucune commune mesure avec celles des opérations qui les ont générées.

Les opérations de déchargement et de destructions massives de Restes Explosifs de Guerre durant et à l'issue de la Première Guerre mondiale en France et en Belgique par des méthodes d'*Open Burning*, d'*Open Detonation* ou encore par celles de vidage / vidange ont introduit dans les sols une très grande diversité de composés et éléments chimiques, pour certains toxiques, persistants et mobiles. Elles ont été à l'origine de pollutions localement sévères, concentrées, des sols de surface et/ou des sols de profondeur. Ces pollutions, exposées depuis plus de cent ans aux intempéries et aux eaux météoriques qui s'infiltrent auraient elles aussi marqué les eaux souterraines, et le cas échéant quelles seraient les relations entre l'empreinte actuelle de la Grande Guerre et/ou de la sortie de guerre sur les eaux souterraines et les pollutions historiques des sols ? L'occurrence d'ions perchlorate (ClO_4^-) à la fois dans (i) les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) constatée dans les régions Haut-de-France et Grand'Est depuis 2011, et à la fois dans (ii) des explosifs explicitement perchlorates et en impuretés dans des explosifs nitrés nitratés et ergols standards et réglementaires largement utilisés durant la Grande Guerre, constitue une première indication de la plausibilité d'une empreinte chimique spécifique des eaux souterraines en lien avec des pollutions des sols découlant de histoire de la Grande Guerre et de la sortie de guerre.

[2003] Audoin-Rouzeau, S. (2023). *La Grande Guerre peut-elle mourir ? Essai sur le référent 1914-1918 en France*. Odile Jacob.

La caractérisation quantitative et qualitative d'une éventuelle empreinte chimique actuelle dans les eaux souterraines spécifique à 14 – 18, et le cas échéant ses origines, ses liens avec le marquage des EDCH par les ions perchlorate, font l'objet de la Section 4e qui suit.

Section 4e
Caractéristiques et origine(s) du marquage des eaux souterraines par les ions perchlorate et les résidus d'explosifs. Une empreinte de la Grande Guerre et/ou de la sortie de guerre ?

1. Introduction de la Section 4e

Il n'existe aucune recherche ou étude publiée établissant le lien entre un conflit armé majeur et une dégradation durable de la qualité des eaux souterraines à l'échelle d'un territoire. Caractériser qualitativement et quantitativement, à l'échelle des territoires concernés, l'empreinte hydrochimique liée à des évènements historiques, brefs mais violents comme des conflits interétatiques de haute intensité, se heurte à plusieurs difficultés techniques. La première est la définition des paramètres analytiques à rechercher, et les capacités des laboratoires d'analyse à doser cette grande diversité de composés à des limites de quantification permettant d'identifier des zones de pollution concentrées tout comme des traces correspondant à un marquage plus diffus des eaux. La seconde est celle de l'échantillonnage des eaux, la construction d'un programme d'échantillonnage en terme de nombre d'échantillons, de localisation et de typologie des points d'accès aux eaux souterraines (sources, puits en pompage, piézomètres, etc.) qui puisse rendre compte de la façon la plus représentative possible de l'état des eaux.

La recherche qui suit vise à (i) identifier, puis à caractériser les éventuels cortèges de substances chimiques entrant typiquement dans la composition des matières énergétiques de la Grande Guerre (poudres et explosifs) présents dans les eaux souterraines des territoires concernés par cet historique (*Fingerprint*), (ii) préciser l'origine « militaire » ou agricole des ions perchlorate reconnus dans les EDCH des régions Haut-de-France et Grand 'Est depuis 2011 puis (iii) discuter des relations entre les occurrences de ces ions et d'éventuelles concentrations d'autres substances énergétiques pour *in fine* (iiii) établir des liens génétiques entre la présence dans les eaux de ces composés et les faits et évènements de la Grande Guerre sur le front occidental et/ou les activités de destructions de Restes Explosifs de Guerre (REG) menées syn- et post-conflit. La finalité de cette recherche est de répondre à l'interrogation s'il existe ou non une empreinte hydrochimique spécifiques à la Grande Guerre dans le quart nord-est de la France, et, le cas échéant, qu'elle est-elle et où et quand trouve-t-elle son ou ses origines ? L'éventuelle contribution des pollutions connues des sols et des sites de destruction de REG par *Open Detonation* et *Open Burning* sera discutée.

La démarche proposée dans ce qui suit pour satisfaire ces objectifs se base sur une approche de caractérisation originale et détaillée des eaux souterraines menée à deux échelles. Cette recherche combine (i) une recherche méthodique à grande échelle d'un panel très large de composés entrant dans la composition des poudres et explosifs des deux Guerres Mondiales des EDCH (campagnes nationales de l'ANSES de recherche des résidus d'explosifs de 2022, et campagne régionale ANSES / ARS du Plan Régional Santé Environnement n°3 en Région Grand'Est) et (ii) un approfondissement des constats, par la densification des points d'échantillonnage et le recours à l'usage d'analyses isotopiques (pour les ions perchlorate), sur des secteurs d'extension géographique restreinte.

Ces analyses isotopiques (abondances des isotopes ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O et ^{35}Cl, ^{36}Cl au sein des molécules de ClO_4^-) visent à discriminer les origines des ions, notamment s'il s'agit d'ions synthétiques sciemment électrosynthétisés pour la fabrication d'explosifs, ou d'ions naturels, présents dans les nitrates du Chili, qu'il s'agisse de nitrates ayant été employés historiquement comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière, ou ayant été décomposés en acide nitrique pour la fabrication de poudres et explosifs nitrés et/ou nitratés. Localement, notamment en Argonne (départements de la Meuse et de la Marne) et à Vauquois (département de la Meuse), des études historiques détaillées couplées à des reconnaissances spéléologiques et archéologiques dans les systèmes profonds de galeries de combat de guerre des mines furent conduites dans le cadre de cette recherche.

2. Campagne nationale ANSES et régionale (PRSE3 Grand'Est) dans les EDCH. Une nouveauté dans les eaux souterraines

2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de son mandat de laboratoire national de référence pour les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH), le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation-environnement-travail (ANSES) a recherché différents composés émergents, au cours de la période 2020-2021, dans les eaux destinées à la consommation humaine. Ces composés, ne sont pas systématiquement réglementés et ne disposent pas toujours de limite de qualité, ils ne sont donc pas recherchés en routine par les ARS (Agences Régionales de Santé) dans le contrôle sanitaire des EDCH. Ces campagnes permettent ainsi d'améliorer la connaissance de l'empreindre hydrochimique anthropique des ressources en eaux et des eaux traitées / distribuées, de disposer de données d'occurrence robustes pour l'évaluation de l'exposition de l'homme à ces composés via les EDCH et, *in fine*, soutiennent également le besoin de faire évoluer la réglementation[2004].

Les travaux d'évaluation des risques sanitaires liés aux ions perchlorate dans l'eau de boisson ont été publiés et aujourd'hui les eaux distribuées renfermant des ions perchlorate sont désormais bien connues (ANSES, 2014)[2005] et les zones marquées font l'objet de suivis renforcés par les ARS. Si l'origine militaire ancienne des ions perchlorate mesurés de nos jours dans les EDCH (provenant pour la grande majorité d'entre elles d'ouvrages sollicitant les eaux souterraines), il est vraisemblable que ces ions puissent être accompagnés par un cortège d'autres substances non recherchées dans le cadre des suivis sanitaires. Cette recherche historique démontre que le recours massif aux explosifs perchlorates était une spécificité de l'artillerie de tranchée, grenades et charges de destruction du Génie français, et qu'ils ne représentaient qu'une très faible fraction (< 10%) du tonnage total des matières énergétiques produites et utilisées durant la guerre, constitué majoritairement d'explosifs nitrés (NAC) et/ou nitratés.

[2004] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane*. Maisons-Alfort : ANSES, 85 p.

[2005] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2014). *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la présence d'ions perchlorate dans le lait infantile et dans l'eau destinée à la consommation humaine.* France Maisons-Alfort: ANSES, 55 p.

La question de la présence de NAC, de leurs sous-produits de transformation environnementale, et des adjuvants des poudres et explosifs, dans les eaux de consommation associés aux ions perchlorate s'est donc posée.

Conformément à l'Article L1311-7 du code de la santé publique, le Plan National Santé Environnement est décliné au niveau régional sous forme de plans régionaux santé environnement, tout en veillant à prendre en compte les problématiques locales et à promouvoir des actions propres aux territoires[2006].

En Grand Est, il est copiloté par l'État, l'Agence Régionale de Santé (ARS) et le Conseil régional. Il vise à promouvoir un environnement favorable à la santé des citoyens, notamment par une meilleure connaissance des expositions des populations aux nuisances liées à leur environnement dans la vie quotidienne (biocides, perturbateurs endocriniens, air intérieur…). Il s'inscrit aux interfaces avec des actions nationales comme le Plan Micropolluant (qualité de l'eau).

Le PRSE3 fléchait la problématique spécifique des ions perchlorate dans les eaux et de manière plus générale celle de polluants dits « émergents », c'est-à-dire des substances présentes dans les eaux, en lien, parfois, avec des activités anciennes, mais qui n'avaient pas encore été recherchées, donc non surveillées avec en corollaire une ressource en eau dont il est fait usage (comme les EDCH) non encore protégée par la réglementation (et des valeurs recommandées, limites ou de référence dans l'eau de boisson). Ainsi l'action 32 du PRSE3 pointait explicitement les perchlorates « *surveiller les substances émergentes prioritaires dans les milieux aquatiques et les captages d'eau destinés à la consommation humaine (perchlorates, bisphénol A et substances de la famille des nitrosamines, parabènes et phtalates)* ». Le pilotage de la ligne d'action du PRSE3 n°1.1 « *Développer la recherche sur les polluants émergents dans les eaux en lien avec des problématiques régionales* » a été confié à l'ANSES.

Ces plans ont pour objectif la territorialisation des politiques définies dans les domaines de la santé et de l'environnement.

Ces plans régionaux s'appuient sur les enjeux prioritaires définis dans le plan national tout en veillant à prendre en compte les facteurs de risques spécifiques aux territoires. Le territoire de la région Grand'Est présente la particularité (i) d'avoir été le champ de bataille de trois conflits majeurs en moins de 70 ans (guerre franco-prussienne (1870), Première Guerre mondiale (1914-1918) et Seconde Guerre mondiale (1939-1945)), (ii) de posséder une longue histoire et tradition militaires avec de nombreuses fortifications, terrains de manœuvre et d'exercice, pour certains actifs, de nombreux casernements et dépôts de munitions. Les polluants émergents d'origine pyrotechnique constituent donc des facteurs de risque supplémentaires spécifiques au territoire de la région Grand'Est et leur recherche dans les milieux d'exposition des populations trouve donc son entière légitimité dans les actions visées par PRSE.

La recherche de résidus d'explosifs dans les EDCH a été inscrit au PRS3 Grand'Est et répond aux objectifs de l'Axe 1 « Des activités humaines préservant l'environnement et la santé », et plus spécifiquement à l'Action 1 « Développer la recherche sur les polluants émergents dans les eaux en lien avec des problématiques régionales / Laboratoire LHN de l'ANSES ».

[2006] Santé Environnement. 3e Plan régional. 2017 > 2021. Grand'Est. https://www.grand-est.prse.fr/IMG/pdf/le_3eme_plan_regional_sante_environnement_region_grand_est_web.pdf.

Ces actions mises en place dans le cadre du PRSE permettent de produire de nouvelles données sur des enjeux de santé environnementale en Grand Est, dans le cadre d'études et de diagnostics notamment[2007]. Un échantillonnage complémentaire réalisé dans le cadre du PRSE3 est donc venu densifier le plan de prélèvement des EDCH de l'ANSES en région Grand'Est en ce qui concerne la recherche des résidus d'explosifs.

Cette campagne s'est focalisée sur des EDCH sélectionnés selon plusieurs critères : (i) la proximité des captages les desservant avec des sites que les recherches historiques et environnementales alors en cours identifiaient comme étant de potentiels émetteurs de ces substances comme les sites de désobusage, ceux de la guerre de mine, suite aux recherches en Argonne, à Vauquois, à La Chapelotte, (ii) l'état des connaissances de la présence dans les EDCH d'ions perchlorate. Cette recherche a largement contribué à orienter l'identification des EDCH potentiellement concernées.

Au total 102 échantillons ont été collectés au niveau des captages (principalement des eaux brutes) et analysés par le LHN en région Grand'Est. Le protocole analytique était semblable à celui appliqué lors de la campagne nationale de l'ANSES.

2.2. PROTOCOLES ANALYTIQUES APPLIQUES (RAPPEL)

Les protocoles analytiques appliqués par le LHN pour les campagnes ANSES et PRSE3 sont ceux retenus pour l'analyse des lixiviats de certains échantillons d'explosifs, et exposés en Section 1h du volet historique du présent manuscrit. Les principales caractéristiques techniques des modes opératoires analytiques sont décrits dans ce qui suit, pour rappel. Une grande diversité de composés chimiques organiques a été recherchée au laboratoire du LHN, regroupant (i) les explosifs nitroraomatiques polaires (comme le 2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*) et apolaires (comme le 2,4,6-trinitrophénol ou TNT, *Tolite*), (ii) les sous-produits de transformation environnementale des espèces nitroaromatiques, (iii) certains intermédiaires de production parfois présents en impuretés dans les formulations industrielles d'explosifs, (iiii) des adjuvants des ergols solides nitrocellulosiques (phénylamines et phénylurées) et enfin (iiiii) des explosifs postérieurs à la Première Guerre mondiale (PETN, RDX, HMX, etc.). Les composés persistants des toxiques de guerre et leurs sous-produits de transformation environnementale n'ont pas été recherchés.

Au regard de la diversité des résidus d'explosifs susceptibles d'être présents et afin de pouvoir analyser un plus large spectre de molécules avec des limites de quantification les plus adéquates, deux principes analytiques ont été mis en œuvre. Au total 54 molécules ont été analysées selon deux filières analytiques :

1. <u>23 molécules</u> ont été dosées par injection directe par chromatographie en phase liquide couplée à de la spectrométrie de masse en tandem (ID-LC-MS/MS). Les limites de quantification (LQ) varient de 10 à 50 $ng.L^{-1}$ avec un domaine d'application allant de 0,010 à 1,25 $\mu g.L^{-1}$ (selon la sensibilité des molécules).

[2007] Région Grand'Est, ARS (2022). *Petit journal Santé Environnement à l'heure du bilan du PRSE Grand'Est 2017-2021*.

2. 31 molécules ont été dosées par une technique innovante basée sur une extraction sur barreau puis désorption et analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à de la spectrométrie de masse en tandem (SBSE-GC-MS/MS)[2008]. Les limites de quantification (LQ) varient de 1 à 50 $ng.L^{-1}$ avec un domaine d'application allant de 0,0005 à 2,5 $\mu g.L^{-1}$ (selon la sensibilité des molécules).

2.3. ECHANTILLONNAGE REALISE

2.3.1 Stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage suivie par l'ANSES lors de ses campagnes nationales exploratoire visant des substances émergeantes repose sur les objectifs suivants (ANSES, 2023) :

- Obtenir une couverture nationale avec des prélèvements réalisés dans chaque département ;
- Etre représentatif d'une proportion importante du débit national (20 à 25%) en réalisant un prélèvement sur l'ouvrage de plus fort débit de chaque département ;
- Intégrer un point d'intérêt, pour chaque famille de composés, proposé par les ARS et retenu en fonction de la vulnérabilité des sites;
- Ajouter un point de prélèvement choisi aléatoirement dans chaque département afin de ne pas se focaliser exclusivement sur des sites vulnérables ou d'intérêt.

Les EDCH faisant l'objet de l'échantillonnage supplémentaire dans le cadre de la campagne PRSE3 ont été sélectionnées par les ARS de chacun des départements concernés, essentiellement sur la base des occurrences connues en ions perchlorate et selon la logique des points d'intérêt.

2.3.2 Choix des EDCH échantillonnées

La sélection des EDCH échantillonné s'est effectuée par un travail collaboratif entre l'ANSES, les Agences Régionales de Santé (ARS) et la Direction Générale de la Santé (DGS).

La démarche suivie par l'ANSES est similaire à celle qui avait été retenue par cette agence en 2011 pour la campagne spécifiquement dédiée aux ions perchlorate : trois points par département, pour l'ensemble des départements du territoire métropolitain, (i) captant la ressource avec le plus gros débit de production (points GD), (ii) un tiré au hasard (points AL) et (iii) le troisième situé à proximité de points d'intérêt (avec une vulnérabilité eu égard aux polluants recherchés) (points PI XPLO). Dans le cas présent, ces points d'intérêt retenus par l'ARS sont ceux situés à proximité de site de production, de stockage, d'abandon ou de destruction de munitions et de matières énergétiques.

[2008] Galmiche, M., Colin, A., Clavos, M.C., Pallez, C., Rosin, C. and Dauchy, X. (2021). *Determination of nitroaromatic explosive residues in water by stir bar sorptive extraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry. Analytical and Bioanalytical Chemistry* 413 (1): 159-169. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00216-020-02985-y.

Le choix de ces derniers points s'est aussi basé sur la recherche historique présentée dans ce manuscrit (et notamment l'existence à proximité des EDCH de sites de destruction de REG)[2009] mais aussi sur la proximité des EDCH avec des sites industriels (armement, explosifs) et/ou des stockages de munitions. Un ensemble de points d'intérêt a été proposé à l'ANSES dont le choix final fut entériné par les ARS. Les considérations hydrogéologiques locales, comme les sens d'écoulement et la nature des captages alimentant les EDCH n'ont pas été pris en compte.

2.3.3 Echantillonnage réalisé

Au final, 363 échantillons d'eaux brutes (CAP) / 346 eaux traitées (TTP), répartis en 270 eaux souterraines / 93 eaux de surface, ont été collectés entre fin 2020 et fin 2021 pour l'analyse au laboratoire. Près de la moitié des échantillons provient des points d'intérêt (cf. Figure 368).

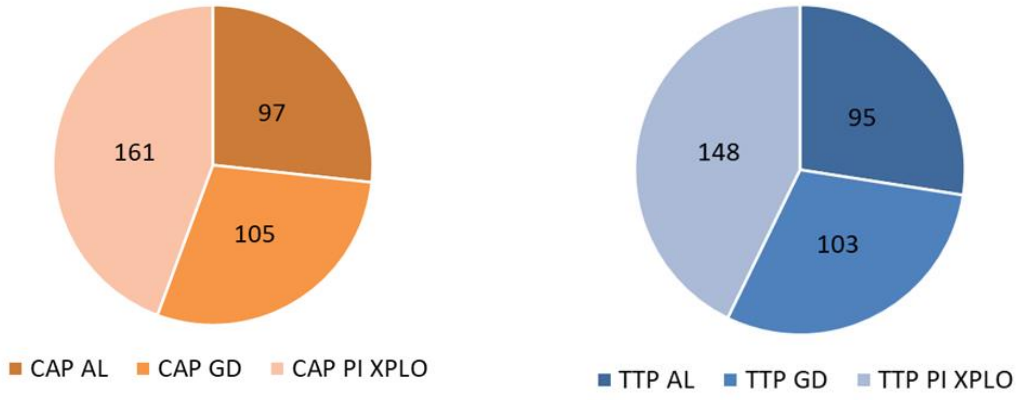


Figure 368 : Distribution des échantillons entre points aléatoires (AL). captages à gros débit (GD) et points d'intérêt (PI XPLO)[2010]. A gauche, les eaux brutes et à droite les eaux traitées.

En résumé, à l'échelle nationale, 54 composés ont été recherchés dans 709 échantillons, soit 36 462 résultats analytiques. Une campagne de confirmation sur des points positifs ou douteux fut ensuite conduite toujours sur la base de 54 composés recherchés, mais sur 31 échantillons soit 1 624 résultats analytiques. Seuls les résultats analytiques des échantillons collectés en régions Grand'Est et Hauts-de-France ont été considérés et exploités dans le cadre de la présente recherche. Le Tableau 67 ci-dessous dresse un bilan du nombre d'échantillons d'EDCH constitués en grandes régions Grand'Est et Hauts-de-France dans le cadre (i) de la campagne nationale de l'ANSES sur les résidus d'explosifs (2020-2022) et, pour Grand'Est, (ii) dans celui de la campagne complémentaire du Plan Régional Santé Environnement n°3 (PRSE3) (2022). Un ensemble de 251 échantillons a été constitué, principalement en région Grand'Est (du fait de la campagne PRSE3 qui ne concerna pas la région Hauts-de-France), majoritairement, pour chaque site, des couples eaux brutes (CAP) / eaux traitées (TTP). Il s'agit dans la très grande majorité des cas d'eaux souterraines, seuls trois sites prélèvent dans les eaux de surface. Si on se reporte à l'échelle des départements, la Meuse est de loin le département pour lequel le nombre d'analyses effectuées s'avère le plus élevé (avec 49 analyses sur 40 sites) (cf. Figure 369). Les communes des deux grandes régions sur lesquelles les EDCH ont été échantillonnées sont localisées sur la carte de la Figure 370.

[2009] Hubé D. (2018). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expériences sur leurs conséquences environnementales*. Rapport final. BRGM/RP-68476-FR, 232 p., 96 fig., 13 tabl., 4 ann., 1 CD.

[2010] Rosin, C. (2023). *ANSES, campagne nationale dans les ressources et les eaux destinées à la consommation humaine : résidus d'explosifs*.

Grande Région	Région	Département	Nombre d'échantillons	CAP (eaux brutes)	TTP (eaux distribuées)	ESO (eaux souterraines)	ESU (eaux superficielles)	CAP/TOTAL	Positifs	Positifs (ratio positifs / points analysés)
Grand'Est (GE)	Alsace	Bas-Rhin	18	9	9	18	0	50,00%	0	0,00%
		Haut-Rhin	18	12	6	18	0	66,67%	1	3,33%
	Champagne Ardenne	Ardennes	15	11	4	15	0	73,33%	1	3,85%
		Aube	12	9	3	12	0	75,00%	0	0,00%
		Haute-Marne	12	6	6	12	0	50,00%	0	0,00%
		Marne	28	19	9	28	0	67,86%	15	31,91%
	Lorraine	Meurthe-et-Moselle	28	23	5	27	1	82,14%	14	27,45%
		Meuse	49	40	9	49	0	81,63%	15	16,85%
		Moselle	7	5	2	7	0	71,43%	0	0,00%
		Vosges	10	6	4	9	1	60,00%	0	0,00%
		Total GE	**197**	**140**	**57**	**195**	**2**	**71,07%**	**45**	**13,35%**
Hauts-de-France (HF)	Nord Pas-de-Calais	Nord	8	4	4	8	0	50,00%	0	0,00%
		Pas-de-Calais	12	6	6	11	1	50,00%	6	33,33%
	Picardie	Oise	14	7	7	14	0	50,00%	2	9,52%
		Somme	10	5	5	10	0	50,00%	6	40,00%
		Aisne	10	5	5	10	0	50,00%	2	13,33%
		Total HF	**54**	**27**	**27**	**53**	**1**	**50,00%**	**16**	**19,75%**
		TOTAL	**251**	**167**	**84**	**248**	**3**	**66,53%**	**61**	**14,59%**

Tableau 67 : Bilan des analyses réalisées par le LHN ANSES en régions Grand'Est et Hauts-de-France (2020-2022).

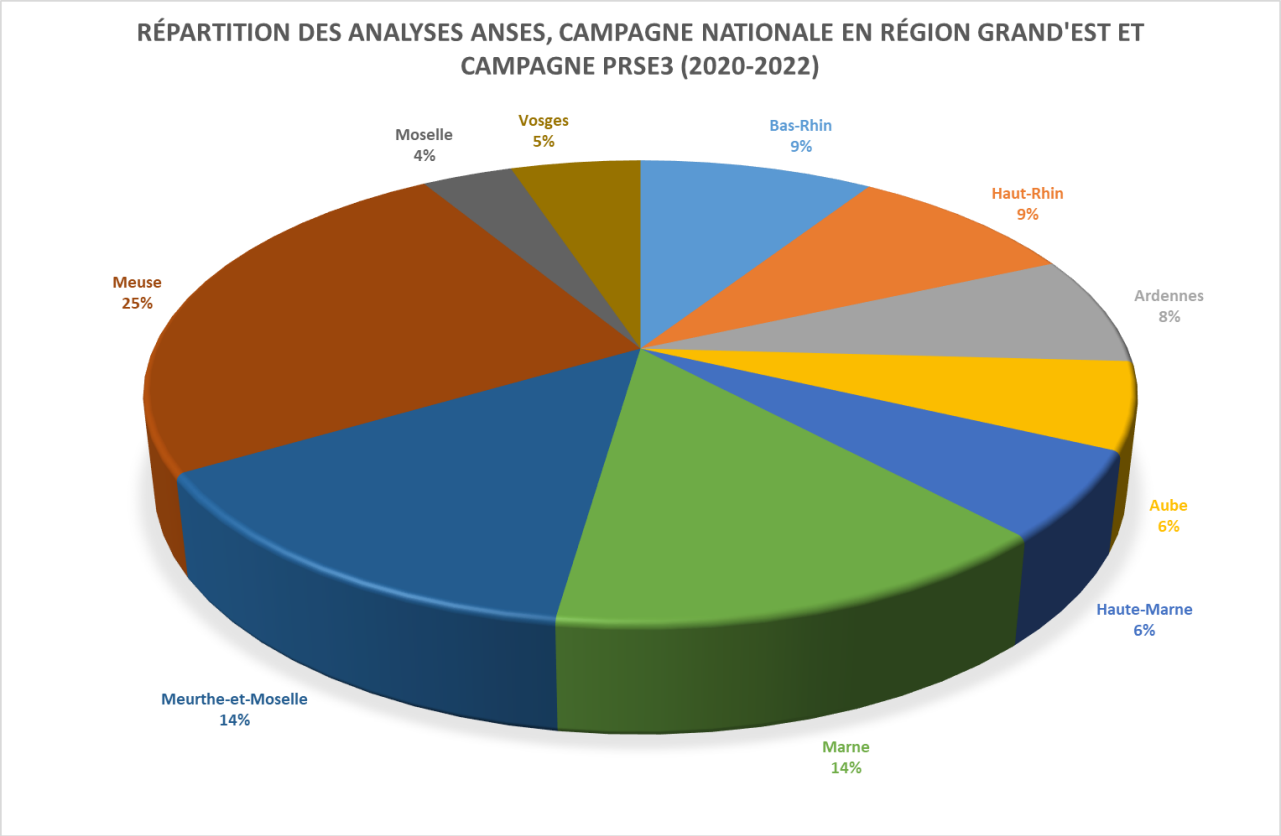


Figure 369 : Répartition des analyses LHN ANSES (2020-2022) par département en région Grand'Est.

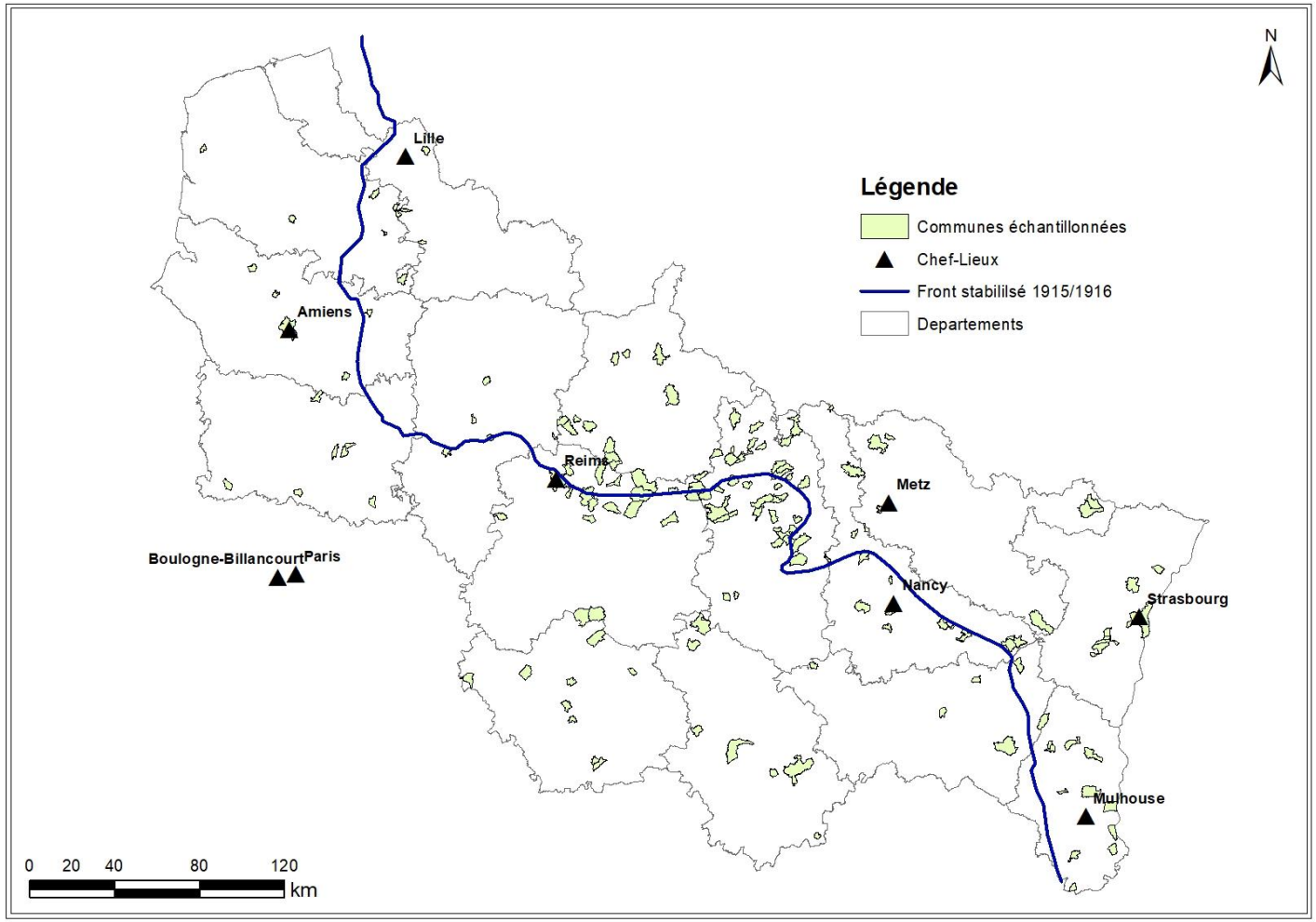


Figure 370 : Communes dont les EDCH ont été échantillonnées pour la recherche de résidus d'explosifs par le LHN, ANSES (campagne nationale ANSES et campagne PRSE3 (2020-2022))

2.4. RESULTATS

Les résultats analytiques des points pour lesquels au moins une molécule a été quantifiée sont rassemblés en Annexe H.

2.4.1 Fréquences de quantification et *Fingerprint* des cortèges de composés nitroaromatiques en présence

A l'échelle globale de la campagne nationale et du territoire métropolitain, sur les 54 molécules analysées, 18 ont été quantifiées au moins une fois (soit 33%). Dans moins de 10% des échantillons (64/709) un composé a été quantifié à une concentration supérieure à la limite de quantification (LQ). Notez que plus de 80 % de ces échantillons sont des points d'intérêt dont le choix a été orienté par la présence de site potentiellement émetteurs des substances recherchées et/ou l'occurrence d'ions perchlorate[2011].

En régions Grand'Est et Hauts-de-France, 61 résultats analytiques montrent la présence d'au moins un composé quantifié, soit une fréquence de quantification d'environ 17% et 12 composés ont été au moins quantifiés une fois. A noter que ces statistiques incluent la 1,3,5-trinitro-hexahydro-1,3,5-triazine (RDX ou « *Research Department Explosive* » ou « *Royal Demolition eXplosive* » ou encore « hexogène ») et la 1,3,5,7-tétranitro-octahydro-1,3,5,7-tétrazocine (HMX ou « *High Melting eXplosive* » ou encore « octogène »), qui sont des explosifs produits et utilisés postérieurement à la Première Guerre mondiale, et les 1-chloro-2-nitrobenzène + 1-chloro-4-nitrobenzène, qui sont des NAC chlorés plutôt en lien avec des activités de l'industrie chimique. Les occurrences de RDX et de HMX sont considérées dans le cadre de cette recherche, centrée sur le cadre temporel de la Première Guerre mondiale et de l'entre-deux-guerres, dans la mesure où ils entrèrent dans des formulations de mélanges explosifs comprenant des composés déjà présents dans ceux de la Première Guerre mondiale et en particulier le TNT.

Les molécules présentant les fréquences de détection les plus élevées sont les isomères du dinitrotoluène (DNT) (cf. Figure 371), parmi lesquels prévaut le 2,6-dinitrotoluène (2,6-DNT) (avec environ 80% de fréquence de quantification dans les échantillons comprenant au moins un positif) (cf. Figure 372). 60% des points pour lesquels les DNT ont été quantifiés présentent un ratio [2,6-DNT] / [2,6-DNT + 2,4-DNT + 2,3-DNT + 3,4-DNT] supérieur à 50% et pour 20% de la population de points, ce ratio excède 80%. Les détections des DNT sont suivies par celles de la ∑(2,4-amino-6-dinitrotoluène, 2,6-amino-4-dinitrotoluène) (ADNT), des 2-, 4-nitrotoluène (NT), du 1,2-dinitrobenzène (DNB), de la 2-nitroaniline (NA) , de la diphénylamine (DPA) et du 2-nitrophénol (NP).

[2011] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane*, *op. cit.*

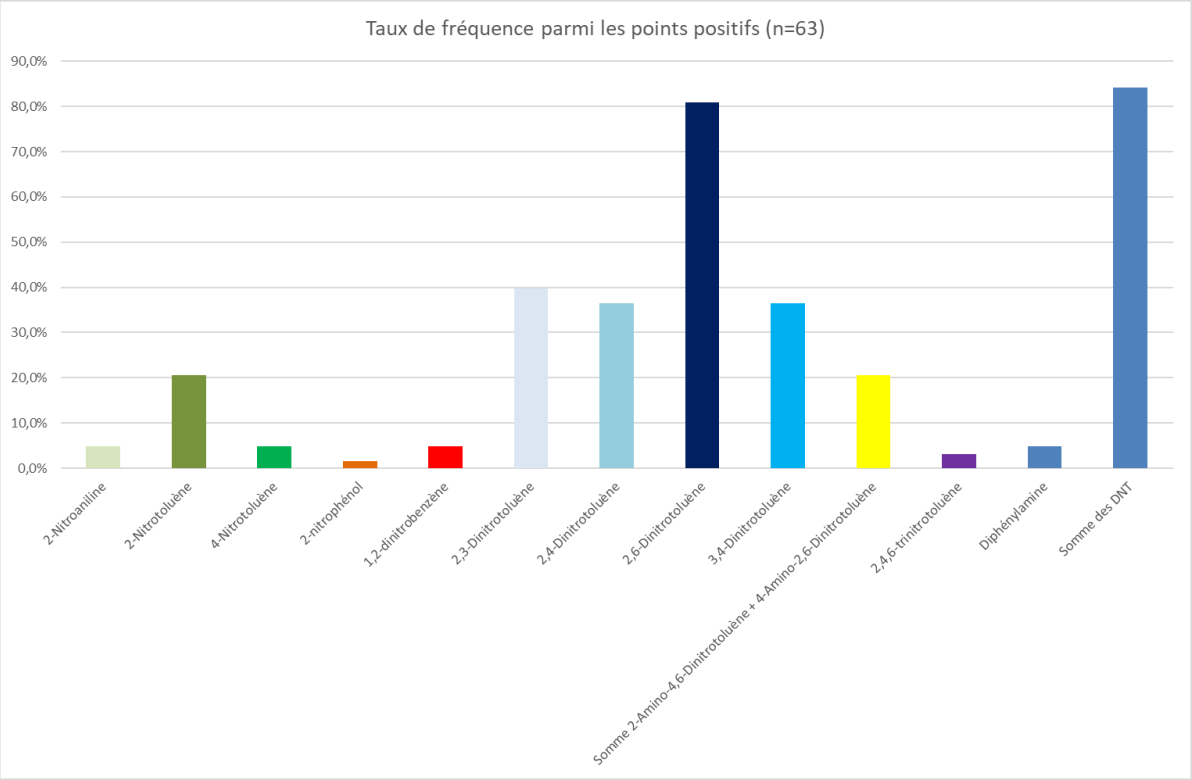


Figure 371 : Taux de fréquence de détection parmi les échantillons présentant au moins un positif (ANSES, 2020-2022).

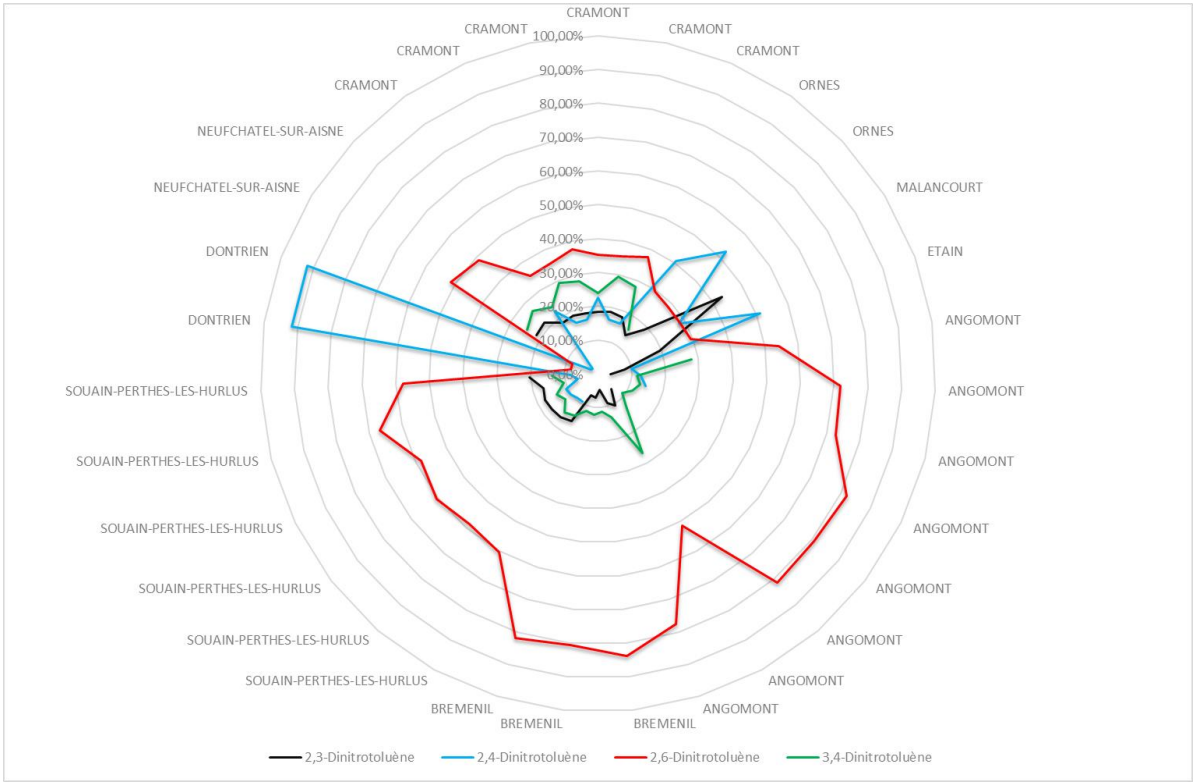


Figure 372 : Représentation radar des fractions des isomères du DNT parmi la somme des concentrations en 2,3-, 2,4-, 2,6- et 3,4-DNT.

Le graphique de la Figure 373 est particulièrement questionnant. Il montre en effet que lorsque les concentrations en isomères de l'ADNT sont significatives, celles en isomères des DNT se réduisent à l'état de traces et à contrario lorsque les cortèges de NAC sont dominés par les DNT, les ADNT sont absents (aux concentrations supérieures à la limite de quantification).

La signature chimique du cortège de NAC mesurée à Cramont (département de la Somme) s'individualise par la présence majoritairement des isomères des ADNT, auxquels s'associent le 1,2-dinitrobenzène (1,2-DNB) et des traces de 2,6-dinitrotoluène (2,6-DNT).

Se dégagent de là trois familles de cortèges (i) ceux, les plus fréquents et aussi présentant les concentrations en NAC les plus élevées, dominés par les DNT et en particulier l'isomère 2,6-DNT, (ii) ceux dominés par les métabolites du TNT (isomères des ADNT) et (iii) celui, complexe, de Cramont marqué par les ADNT et le 1,2-DNB avec des traces de l'ensemble des isomètres des DNT. On identifie aussi des points singuliers. Le 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) n'a été quantifié que sur un site (Précy-sur-Oise (département de l'Oise)) avec des concentrations faibles, n'excédant pas 68 ng/L (eaux brutes). La diphénylamine (DPA) a été quantifiée à l'état de traces en trois points (Lhuître (département de l'Aube). Clermont-en-Argonne (département de la Meuse) et Witry-les-Reims (département de la Marne)) avec des concentrations comprises entre 12 et 13 ng.L^{-1}.

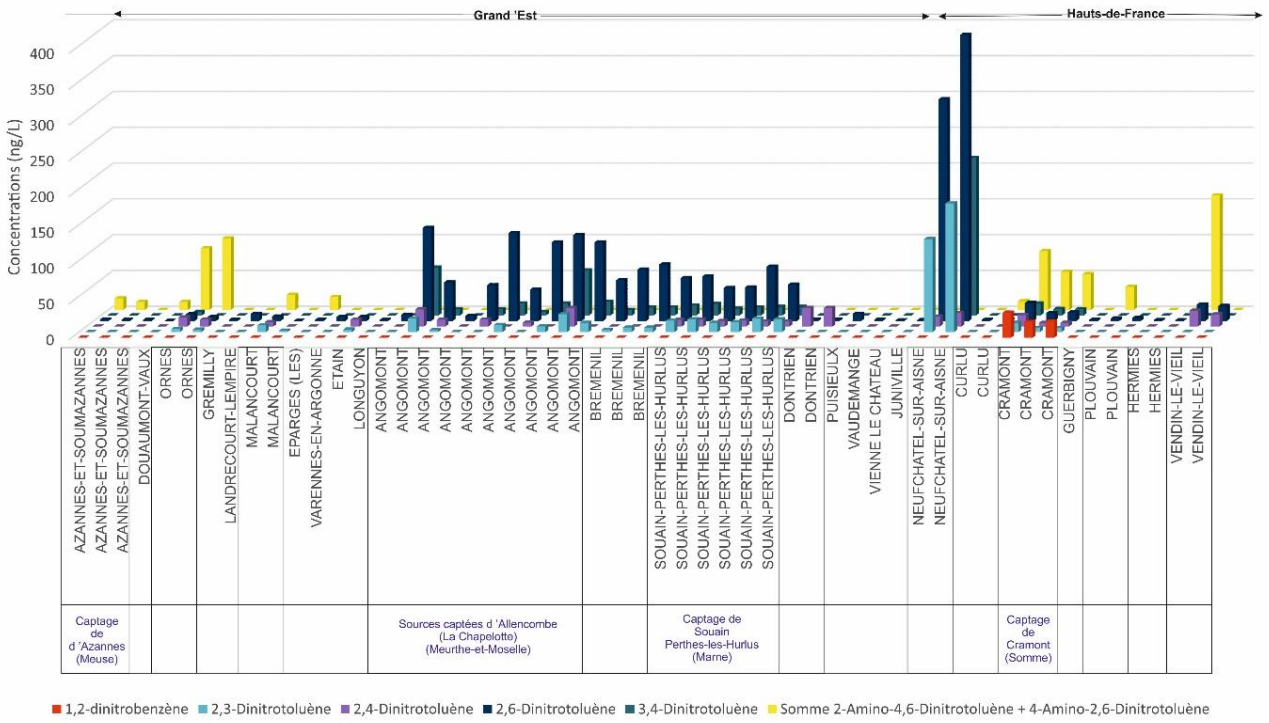


Figure 373 : Distribution des concentrations (ng.L^{-1}) en DNT, ADNT et DNB (ANSES, (2020-2022)).

On constate (cf. Figure 374) qu'aux concentrations en NAC inférieures à 80 ng.L^{-1} environ, les isomères du DNT peuvent représenter jusqu'à 100% des NAC détectés et quantifiés dans les échantillons (droite 1 :1 du graphique de la Figure 374). Aux concentrations excédant 80 ng/L, les isomères du DNT sont systématiquement associés à d'autres NAC comme les ADNT, le nitrotoluène (les points s'écartent de la droite 1 :1 du graphique de la Figure 374).

Ainsi, il est vraisemblable qu'aux faibles concentrations en NAC, les DNT soient accompagnés par un cortège d'autres composés mais à des concentrations inférieures aux limites de quantification (LQ) appliquées par le laboratoire.

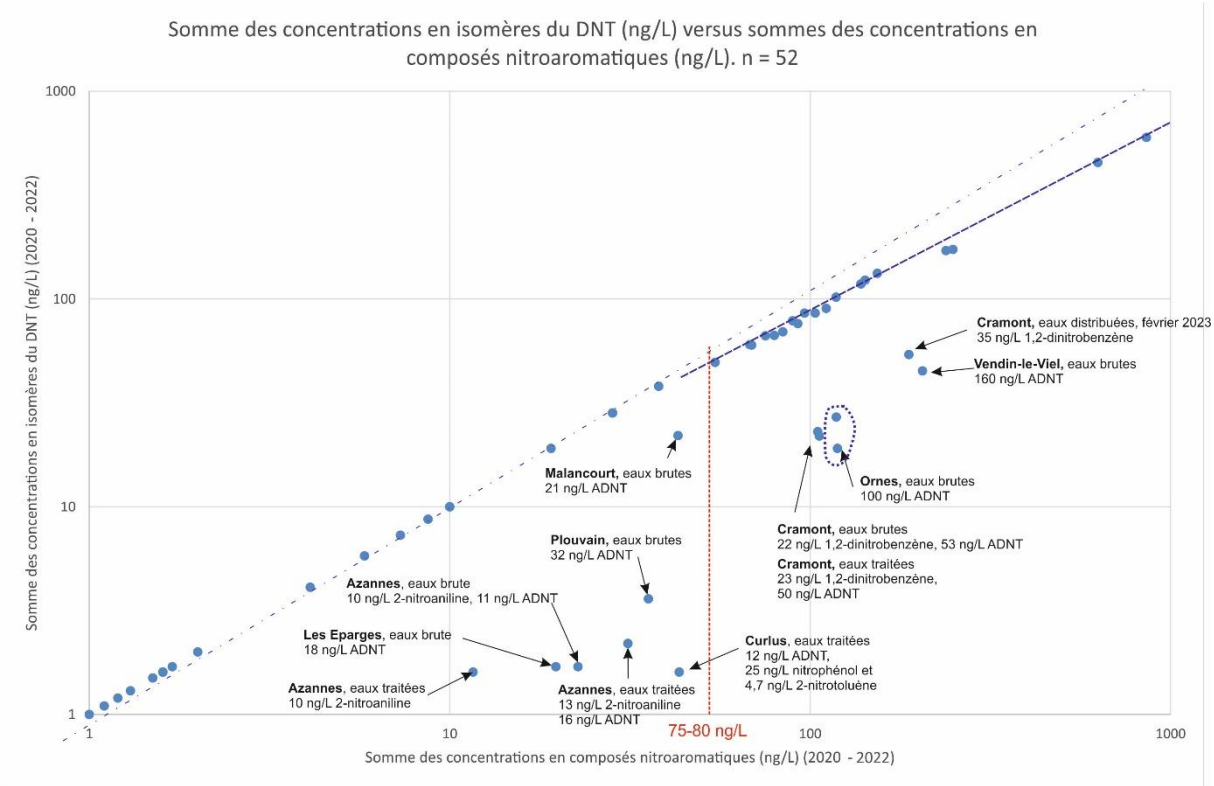


Figure 374 : Somme des concentrations des isomères du DNT (ng.L^{-1}) versus somme des concentrations en composés nitroaromatiques (ng.L^{-1}) (points pour lesquels au moins un isomère du DNT a été quantifié) (ANSES, 2020-2022).

2.4.2 Gammes de concentrations mesurées

La somme des concentrations en composés nitroaromatiques (∑NAC) reste faible et n'excède pas 875 ng.L^{-1} (eaux traitées) et 628 ng.L^{-1} (eaux brutes) à Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne), et sur ces EDCH, 400 ng.L^{-1} pour le composé le plus fréquemment quantifié (2,6-dinitrotoluène). Toutefois, ces concentrations ne sont pas à négliger au regard de certaines valeurs guides utilisées en Allemagne *(Insignificance thresholds for groundwater)*[2012] et des standards existants concernant les limites de qualité des EDCH aux USA [2013].

[2012] *Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2017) Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Aktualisierte und überarbeitete Fassung.* Les « *Insignificance thresholds for groundwater* » sont des valeurs de concentration établies par le groupe de travail fédéral LAWA (*Länderarbeitsgemeinschaft Wasser*) au-delà desquelles les eaux souterraines sont considérées comme impactées et nécessietnt des investigations approfondies ; ces valeurs sont les suivantes : 2-nitrotoluène (1 µg.L^{-1}). 3-nitrotoluène (10 µg.L^{-1}). 4-nitrotoluène (3 µg.L^{-1}). 2-amino-4,6-dinitrotoluène (0,2 µg.L^{-1}). 4-amino-2,6-dinitrotoluène (0,2 µg.L^{-1}). 2,4/2,6-dinitrotolène (0,05 µg.L^{-1}). 2,4,6-trinitrotoluène (0,2 µg.L^{-1}). Acide picrique (0,2 µg.L^{-1}). Nitrobenzène (0,7 µg.L^{-1}). 1,3,5-trinitrobenzène (100 µg.L^{-1}). 1,3-dinitrobenzène (0,3 µg.L^{-1}).

[2013] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane, op. cit*., p.32.

Les autres points d'EDCH significativement marqués sont Angomont (cinq sources captées d'Allencombe, secteur de Badonviller, département de la Meurthe-et-Moselle) avec une concentration maximale mesurée de 249 ng.L^{-1} (∑NAC), Cramont (département de la Somme) avec 106 ng.L^{-1} (eaux brutes du captage), Vendin-le-Viel (département du Pas-de-Calais) avec 205 ng.L^{-1} (eaux brutes du captage) et Souain Perthes-les-Hurlus (département de la Marne) avec 111 ng.L^{-1} (eaux traitées).

A noter que le seul composé issu d'explosifs contemporains postérieurs à la Grande Guerre qui a été quantifié est le RDX, dans cinq échantillons provenant de trois sites (Mourmelon-le-Grand (département de la Marne), Belrupt-en-Verdunois (département de la Meuse) et Lhuitre (département de l'Aube)) avec des concentrations comprises entre 14 et 96 ng/L (Mourmelon-le-Grand).

2.4.3 Influence du traitement de potabilisation des EDCH sur les concentrations en composés nitroaromatiques

A noter que des écarts significatifs des concentrations en NAC sont localement constatés (EDCH surlignée de bleu ou de vert dans le Tableau 68 suivant) entre les eaux brutes et les eaux traitées puis distribuées. Ces écarts seraient à mettre en relation avec (i) les modalités du traitement (les NAC étant photosensibles, ils pourraient être dégradés par un traitement UV, ou oxydés par ozonisation) et/ou (ii) les modalités d'exploitation des captages. Les eaux traitées peuvent présenter (surligné de vert) des concentrations en NAC supérieures dans les eaux distribuées et traitées à celles des eaux brutes. A contrario (surligné de bleu), les eaux traitées apparaissent moins marquées que les eaux brutes. La première tendance serait vraisemblablement liée aux modalités d'exploitation des forages (discontinu), aux fluctuations de qualité des eaux brutes captées, alimentant un réservoir (mélange des eaux) avant traitement et distribution, et la seconde au traitement des eaux brutes.

Commune	Département	CAP (eaux brutes)	TTP (eaux traitées distribuées)	Unité
Neufchâtel-sur-Aisne	Aisne	640,7	875	ng.L^{-1}
Dontrien	Marne	28,3	28,3	
Souain Perthes-les-Hurlus	Marne	103,3	110,8	
Guerbigny	Somme	1,7	1,6	
Curlu	Somme	1,6	43,3	
Cramont	Somme	106	104,9	
Précy-sur-Oise	Oise	68	28	
Plouvain	Pas-de-Calais	35,6	4,1	
Hermies	Pas-de-Calais	1,2	1,1	
Vendin-le-Viel	Pas-de-Calais	205	38	

Tableau 68 : Comparatif des sommes des composés nitroaromatiques pour les eaux brutes et les eaux traitées des EDCH pour lesquelles le couple est positif (ANSES, 2020-2022).

2.4.4 Concentrations en ions perchlorate versus concentrations en composés nitroaromatiques

Lors de la campagne nationale ANSES de recherche des résidus d'explosifs dans les EDCH, l'analyse des ions perchlorate a aussi été réalisée afin de mettre en évidence une éventuelle corrélation entre les concentrations en NAC et celles en ions perchlorate et en corollaire de vérifier le caractère « sentinelle » de l'ion perchlorate par rapport à l'occurrence dans les eaux d'un cortège d'autres molécules énergétiques.

Selon ANSES (2023)[2014] « *en présence de molécules dites « historiques » telles que les dinitrotoluènes, les amino-dinitrotoluènes, les ions perchlorate ont été également quantifiés. A l'inverse, lorsque des molécules comme HMX, RDX ou encore la diphénylamine sont présentes, il y a absence d'ions perchlorate. Cette observation illustre le caractère prédictif de l'ion perchlorate pour les pollutions nitro-aromatiques historiques* ».

Lorsque les composés typiques des explosifs anciens (« molécules historiques ») ont été quantifiés, 40% des échantillons présentent des concentrations en ions perchlorates supérieurs à la limite de quantification (> 2 µgClO_4^-.L^{-1}).

Sur les 26 points reconnus positifs par la présence quantifiée de NAC lors de la campagne nationale de l'ANSES, 24 montrent des quantifications en ions perchlorate (> 2 µgClO_4^-/L) (soit 92% des points positifs en NAC). Toutefois, lorsqu'on reporte les concentrations en NAC et en ions perchlorate dans un graphique, on ne constate pas de corrélation significative entre les concentrations en ions perchlorate et celles en NAC (cf. Figure 375). Deux nuages de points semblent se distinguer (i) un ensemble de points aux concentrations élevées en ions perchlorate pour lesquels les NAC sont présents à l'état de traces < 5 ng.L^{-1} ; une tendance à la hausse des concentrations en ions perchlorate lorsque les concentrations en NAC augmentent semble se dessiner dans ce nuage de points, (ii) un ensemble de points avec des concentrations variables en NAC, supérieures à 30 ng.L^{-1}, avec une grande variabilité des concentrations en ions perchlorate.. Les concentrations élevées en NAC mesurées à Neufchâtel-sur-Aisne sont associées à de fortes concentrations en ions perchlorate (~100 µgClO_4^-.L^{-1}).

Il est ainsi vraisemblable à ce stade des recherches que des sources majoritairement perchloratées, influençant la qualité des eaux souterraines, puissent être dissociées d'autres sources nitroaromatiques liées, à degrés variables, aux ions perchlorate.

Si concentrations en ions perchlorate et celles en NAC sont liées aux fortes concentrations, les concentrations en NAC sont susceptibles de suivre la même variabilité temporelle que celle observées pour les ions perchlorate au niveau du captage de Neufchâtel-sur-Aisne. Les fluctuations temporelles des concentrations sont importantes, avec une amplitude maximale d'un facteur 10.

[2014] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane*, *op. cit*,, p. 38.

Figure 375 : Concentrations en ions perchlorate versus sommes des concentrations en composés nitroaromatiques (campagne nationale ANSES (2020 -2022)).

2.4.5 Distribution géographique

Les communes où au moins un NAC a été quantifié dans les EDCH ont été identifiées et positionnées sur la carte de la Figure 376. La Figure 377 est ciblée sur les quantifications des DNT.

Les départements de la Meuse, de la Meurthe-et-Moselle et de la Marne rassemblent près des ¾ des analyses positives, à proportions quasiment également entre ces trois départements. La surreprésentation des départements de la région Grand'Est par rapport aux Hauts-de-France est un biais lié à une plus forte densité de points échantillonnés à la faveur de la campagne du PRSE3 qui visait spécifiquement la région Grand'Est (avec *in fine* trois fois plus d'échantillons collectés en région Grand'Est qu'en Hauts-de-France).

En région Grand'Est, les départements de la Meuse, de la Meurthe-et-Moselle et de la Marne sont aussi ceux montrant le plus grand nombre d'échantillons (65% des échantillons constitués en région Grand'Est).

La distribution géographique des points positifs est nettement contrainte par la méthodologie de sélection des points échantillonnés appliquée par les ARS et l'ANSES, et notamment, pour un point par département (sur les trois points échantillonnés sur ces territoires lors de la campagne nationale de l'ANSES (2020 – 2022)), par le choix de la proximité des UDI avec des sites historiques susceptibles d'avoir introduit dans les sols puis les eaux, des composés entrant dans la composition des poudres et explosifs. Il s'agit notamment de la proximité avec (i) les anciennes lignes de front des combats de la Première Guerre mondiale, (ii) les zones de guerre de mine, (iii) les sites de stockage et de neutralisation de munitions anciennes et Restes Explosifs de Guerre. On rappelle aussi que ces recherches se sont focalisées dans les secteurs où la présence dans les EDCH d'ions perchlorate était avérée.

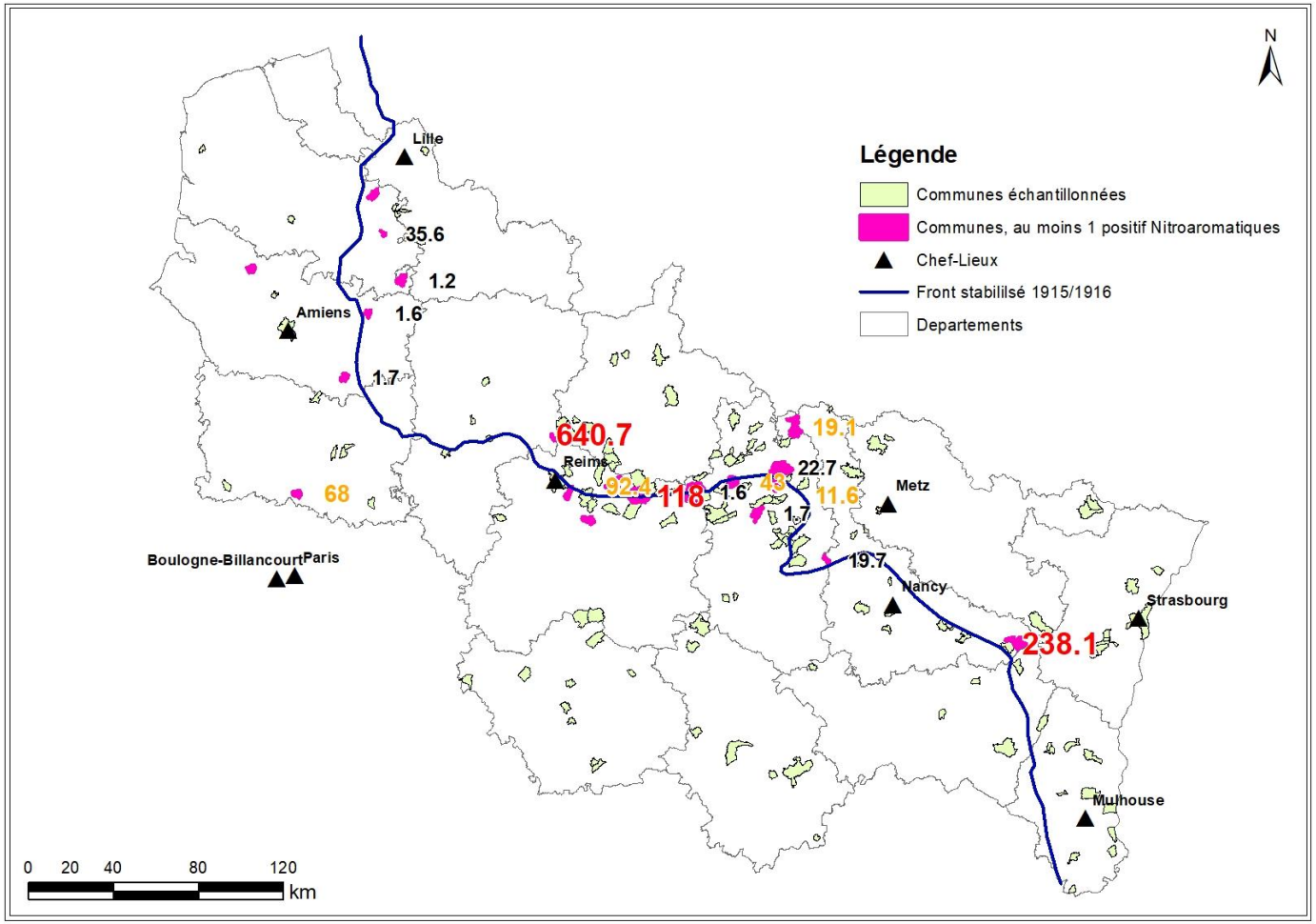


Figure 376 : Concentrations maximales mesurées (eaux brutes) en composés nitroaromatiques dans les EDCH (∑NAC), campagne nationale ANSES et PRSE3 (2020 – 2022). Régions Grand'Est et Hauts-de-France.

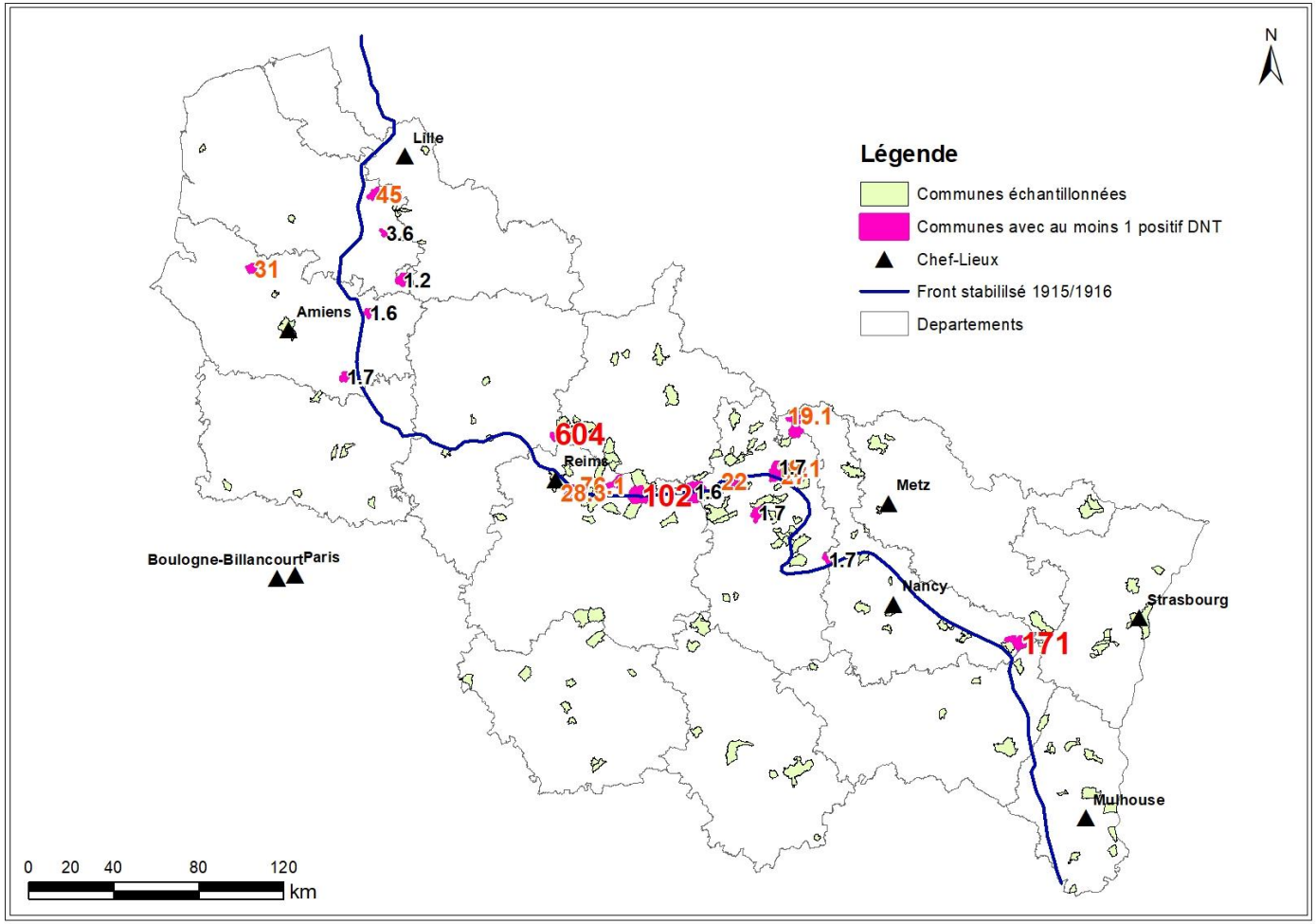


Figure 377 : Concentrations maximales mesurées (eaux brutes) en DNT dans les EDCH (∑DNT), campagne nationale ANSES et PRSE3 (2020 – 2022). Régions Grand'Est et Hauts-de-France.

2.5. CONCLUSION

2.5.1 Mise en évidence inédite de composés d'origine pyrotechnique anciens

L'occurrence d'ions perchlorate (un composé énergétique entrant notamment dans la composition de certains explosifs de la Grande Guerre) identifiés dans les EDCH par les ARS dans le quart nord-est de la France entre 2011 et 2015 ouvre sur l'hypothèse de la présence éventuelle, associée aux ions perchlorate, d'autres composés énergétiques caractéristiques d'explosifs anciens. Ces composés dits « émergents » ne sont pas réglementés et ne disposent pas de limites de qualité. Ils ne sont donc pas recherchés dans le contrôle sanitaire en routine des EDCH. Le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES) a souhaité, dans le cadre de ses missions de référence, renforcer la connaissance de la qualité sanitaire des EDCH au travers d'une campagne nationale exploratoire de recherche méthodique de ces composés émergents[2015].

D'importants efforts ont été consentis entre 2017 et 2020 par le LHN de l'ANSES afin de développer des méthodes analytiques pour doser une cinquantaine de molécules chimiques entrant dans la formulation des poudres et explosifs des deux conflits mondiaux, (composés énergétiques et adjuvants), ainsi que leurs impuretés et sous-produits de transformation environnementale. L'établissement de la liste des paramètres analytiques s'appuie sur des recherches historiques et bibliographiques (concernant les transformations environnementales). Une campagne nationale d'échantillonnage et d'analyse sur 300 points a été réalisée par les ARS sous le pilotage de l'ANSES entre 2020 et 2022. La densité de points d'échantillonnage a été rehaussée en région Grand'Est en 2022 par une centaine de points de prélèvements supplémentaires afin de répondre aux objectifs du Plan Régional Santé Environnement n°3 (PRSE3). La présente recherche s'est concentrée sur les régions Grand'Est et Hauts-de-France, toutes deux directement concernées par les lignes du front occidental de la Première Guerre mondiale et par l'occurrence régionale d'ions perchlorate dans les EDCH. Un ensemble de 251 échantillons a été constitué sur ces territoires dont 197 pour la seule région Grand'Est.

La première conclusion tirée de ces études diagnostics diligentées par l'ANSES est que localement, des composés typiques d'explosifs anciens ont été détectés et quantifiés dans les EDCH, dans des secteurs géographiques situés sur ou aux abords des anciennes lignes du front occidental de la Grande Guerre.

Environ 17% des échantillons analysés montrent la présence à des concentrations supérieures aux limites de quantification appliquées par le LHN pour au moins un composé (soit 61 échantillons « positifs », dont 45 en région Grand'Est). Ont été identifiés par le LHN dans les eaux destinées à la consommation humaine, provenant pour la très grande majorité d'entre elles des eaux souterraines (via des puits et sources captées), des composés chimiques organiques nitroaromatiques (NAC), qui sont des composés de synthèse, xénobiotiques, absents du fond géochimique naturel.

[2015] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane*, *op. cit.*

Il s'agit pour l'essentiel d'isomères du dinitrotoluène (DNT), dominées par le 2,6-dinitrotoluène. Les autres composés quantifiés sont les isomères des ADNT (amino-dinitrotoluène), et plus ponctuellement le TNT, le dinitrobenzène (DNB). Les concentrations en NAC (somme des composés) restent inférieures à 1 $\mu g.L^{-1}$ (les plus élevées s'établissent à 857 $ng.L^{-1}$ pour ∑NAC, et 400 $ng.L^{-1}$ pour le 2,6-dinitrotoluène). Leur occurrence est toutefois indicatrice d'une influence de sources de pollutions de produits énergétiques anciens sur la qualité des EDCH.

Trois familles de cortèges ont été identifiées (i) celle dominée par les isomères des DNT (avec une prévalence du 2,6-DNT), (ii) celle majoritairement représentée par les ADNT et (iii) des *Fingerprints* singuliers comme à Cramont (DNT, ADNT, DNB) ou Précy-sur-Oise (TNT).

Si les NAC ont été détectés et quantifiés dans les EDCH marqués par les ions perchlorate, il n'apparaît pas de corrélation significative entre les concentrations en ClO_4^- et celles de la ∑NAC, ce qui suggère des sources dissociées.

2.5.2 Avantages et limites du diagnostic

L'approche retenue par l'ANSES pour le choix des échantillons présente l'avantage, à l'échelle du territoire métropolitain et avec un nombre raisonnable d'échantillons, de couvrir 20% du débit national de production, tout en conservant un ratio ESO/ESU équilibré. Elle évite enfin les effets de pépite générés par des focus sur les points noirs.

Ce diagnostic ne prétend à aucune exhaustivité. Ses résultats restent indicatifs de l'état de la ressource en eau. Il s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la connaissance de l'état des eaux distribuées en France, d'identification à l'échelle nationale de polluants émergents, et de protection de la population générale eu égard à la présence dans les eaux de boisson d'éventuelles substances échappant aux contrôles sanitaires de routine et à la réglementation sur la qualité des eaux. Ces campagnes photographiques nationales et/ou régionales visent la qualité des EDCH. Ces EDCH ne sont pas nécessairement représentatives de la qualité des eaux souterraines, de la ressource en eau, compte tenu des modalités d'exploitation des forages, des réseaux d'alimentation des réservoirs (mélanges des eaux provenant de plusieurs forages, etc.), et des traitements de potabilisation.

Cet état des lieux ne rend compte (i) ni de l'empreinte générale (extension et distribution géographique) des polluants d'origine pyrotechniques sur les eaux souterraines (ii) ni de la qualité réelle des eaux souterraines et aquifères sollicités pour les EDCH (en terme de gammes de concentrations), (iii) ni des éventuelles fluctuations quantitatives (des concentrations) et qualitatives (des *Fingerprints*) en fonction du temps (fluctuations saisonnières et/ou selon les évolutions des niveaux piézométriques et/ou pluviométriques). Il s'agit d'un aperçu ponctuel sur quelques captages ou réservoirs, par département, de la qualité des eaux distribués, à un temps donné, dissocié des considérations hydrogéologiques locales et de la dynamique des eaux. Les limites et inconvénients d'une telle approche sont ceux de s'exposer à un risque de passer à côté de sites fortement impactés.

2.5.3 Nécessité d'études sectorielles approfondies locales

Les substances d'origine pyrotechniques anciennes ont été mises en évidence dans les EDCH dans le quart nord-est la France. Le diagnostic de l'ANSES ne saurait dresser une cartographie représentative des distributions des concentrations et cortèges de composés à l'échelle des aquifères et du territoire métropolitain.

Se pose à présent la question de l'origine des substances, de leurs sources et des mécanismes en jeu dans leur mobilisation vers la ressource et s'il existe des liens entre cette empreinte imprimée de nos jours dans les eaux et les évènements de la Grande Guerre ou des pratiques de la sortie de guerre décrites dans le volet historique du présent manuscrit. Un changement d'échelle des secteurs d'étude s'impose alors pour cela avec une focale beaucoup plus locale, visant directement les eaux souterraines afin de confronter (i) les constats concernant l'extension du marquage des eaux par les composés d'origine pyrotechnique et, au sein du périmètre impacté, la distribution spatiale des concentrations (les gradients) et des cortèges de substances avec (ii) l'historique de l'usage des substances identifiées dans les bassins versants alimentant ces eaux. Enfin, les combats de la Grande Guerre, ainsi que les activités de destruction de munitions anciennes eurent pour décor des environnements agricoles dans lesquels, pour soutenir l'exploitation betteravière, on fit appel entre 1850 et 1950 à un usage massif d'engrais nitratés importés du Chili, riches en perchlorate, potentiellement pourvoyeur de perchlorates naturels, non militaires, dans les sols et les eaux souterraines. Pour pouvoir interpréter les éventuelles relations entre les occurrences en ions perchlorate dans la ressource en eau avec celles des NAC, les origines agricoles, naturelles, ou militaires, à priori synthétique, de ClO_4^- doivent être discriminées.

3. Etudes sectorielles

3.1. METHODES, MOYENS ET DEMARCHE RETENUS

3.1.1 Démarche générale

La démarche générale est celle d'un échantillonnage dense ou ponctuel des eaux souterraines et/ou superficielles dans des secteurs géographiques restreints (de quelques km^2) réputés être significativement impactés par les ions perchlorate et/ou les NAC, au regard des résultats des campagnes nationales et régionales 2020-2022 de l'ANSES. Réduire l'échelle du diagnostic c'est aussi pouvoir sur ces secteurs géographiques, resituer les résultats dans leurs contextes (i) historiques (quels sont les faits, pratiques et évènements susceptibles d'avoir introduit dans les eaux les composés identifiés ?) et (ii) hydrogéologiques locaux.

A Vauquois et en Argonne, hauts lieux de la guerre souterraines des mines, plusieurs reconnaissances spéléologiques et archéologiques des systèmes profonds de galeries (françaises et allemandes) ont été effectuées, jusqu'aux extrémités ennoyées (vers 50-60 m de profondeur) afin d'accéder aux eaux souterraines pour leur échantillonnage et d'observer la présence éventuelle de Restes Explosifs de Guerre et de matériels explosibles abandonnés. Ces reconnaissances ont été rendues possibles par un encadrement par un personnel expérimenté, compétent, en charge de l'étude et de la préservation de ces vestiges (sur mandat de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC)).

3.1.2 Choix des secteurs d'études approfondies

Le choix de secteurs d'étude offrant les meilleures potentialités de répondre aux questions et enjeux scientifiques concernant les origines, sources et faits historiques générateurs du marquage des eaux par les ions perchlorate, et autres composés issus de matières énergétiques anciennes, s'est rapidement porté sur quatre secteurs qui présentent tous une même singularité. Il s'agit des premiers secteurs investigués dans le cadre de cette recherche.

Il s'agit d'abord de portions de l'ancien front occidental, pas nécessairement actifs durant toute la durée de la guerre, mais qui ont été le théâtre de violents combats impliquant des duels d'artillerie et parfois l'usage de la guerre de mines, surtout en 1915, qui n'ont jamais connus, que ce soit avant-guerre ou après-guerre, d'autres activités anthropiques potentiellement polluantes que celles des combats de 1914-1918. Ces sites furent tous sanctuarisés en « zone rouge » et/ou lieux de mémoire post-conflit. Il s'agit des secteurs (i) du massif de l'Argonne, à cheval sur les départements de la Marne, sur son versant ouest, et de la Meuse, sur son versant est ,(ii) de la butte de Vauquois (département de la Meuse), (iii) du champ de bataille du Lingekopf dans les Hautes-Vosges (communes de Hohrod et Hohrodberg, département du Haut-Rhin) et (iiii) du champ de bataille de La Chapelotte dans les Vosges gréseuses du versant lorrain du massif des Vosges (commune de Badonviller, département de la Meurthe-et-Moselle). Les sites de l'Argonne (Haute-Chevauchée, Fille Morte, Corniche, etc.), de Vauquois, de La Chapelotte sont connus comme des hauts lieux de la guerre de mines, de par le nombre d'explosions et les extensions verticales et horizontales des points de détonation.

Ces sites des massifs de l'Argonne et des Vosges sont situés en environnement forestier, ce qui les distingue d'autres secteurs actifs du front (i) où les combats se déroulèrent en environnement agricole voire industriel et urbain (Soisson, Lens, Arras, Ypres), (ii) où les eaux souterraines peuvent donc être marquées par des perchlorate d'origine agricole et/ou industrielle. Il s'agit aussi de secteurs où les eaux souterraines sont directement accessibles (donc aisément échantillonnables), car sourdent au niveau de nombreuses sources, alimentées par des bassins versants d'extension limitée et bien identifiée. Il est donc possible d'émettre des hypothèses fiables ou des conclusions sur les relations entre les activités historiques passées au sein des aires d'alimentation des sources et les éventuelles présences de composés caractéristiques des explosifs de 1914-1918 dans les eaux de ces sources. Il s'agit de secteurs présentant les meilleures potentialités d'explorer l'existence ou non d'un *Fingerprint* hydrochimique spécifique de 1914-1918 sur les eaux souterraines.

Les résultats des campagnes de diagnostics de l'ANSES au niveau national puis resserrées au niveau régional en Grand'Est ont pointé du doigt l'existence de sites très significativement marqués par les ions perchlorates et de façon plus inattendue par une vaste gamme de composés appartenant à la famille des NAC qui entraient dans la composition des poudres et explosifs de la Grande Guerre. Les recherches ont été étendues à ces secteurs au regard de ces résultats mais aussi à celui de considérations historiques et de nouvelles connaissances produites par cette recherche. Trois autres secteurs furent alors identifiés sur ces considérations. L'est marnais, autour du camp militaire de Suippes, le point de Neufchâtel-sur-Aisne (dans le département de l'Aisne) et enfin le secteur de Cramont – Domléger – Conteville dans le département de la Somme. Seul le secteur de l'Argonne / Vauquois fait l'objet dans ce qui suit d'un développement historique et hydrogéologique détaillé compte tenu de l'intérêt environnemental de ce secteur et de la forte densité de points de mesure réalisés à la faveur de cette recherche.

En résumé, les secteurs ayant été retenus pour les études approfondies sont suivants (du nord au sud suivant l'ancienne ligne du front occidental (cf. Figure 378)) :

1. Cramont, Conteville (département de la Somme), sur la Craie,

2. Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne), sur la Craie,

3. Secteur est Rémois (département de la Marne), sur la Craie de Champagne,

4. Secteur de Suippes (département de la Marne), comprenant les puits de Dontrien et de Souain Perthes-les-Hurlus, sur la Craie de Champagne,

5. Secteur Argonne auquel on rattache celui de Vauquois (département de la Marne et de la Meuse) établi sur le massif de la Gaize,

6. Secteur de La Chapelotte, commune de Badonviller (département de la Meurthe-et-Moselle), sur le versant lorrain du massif des Vosges septentrionales (Vosges gréseuses).

7. Secteur du Lingekopf, commune de Hohrod (département du Haut-Rhin), établi sur les formations granitiques et métamorphiques du massif des Vosges méridionales.

Figure 378 : Localisation des secteurs ayant fait l'objet d'études approfondies (études sectorielles) et de prélèvements pour les analyses isotopiques Cl, O de ClO_4^-.

3.1.3 Caractérisation des composés d'origine pyrotechnique dans les eaux. Approche analytique

Les points d'échantillonnage des eaux des secteurs d'étude correspondent soit (i) à des sources captées ou non aménagées soit (ii) à des EDCH, soit (iii) à des eaux de surface ou encore (iiii) à des eaux souterraines accessibles à l'extrémité de galeries de systèmes profonds de guerre des mines ennoyés. Les eaux destinées à l'analyse des composés inorganiques par le laboratoire du BRGM ont été filtrées à 0,45 µm et conditionnées dans des flacons de 100 mL en PE. Les composés organiques nitroaromatiques (NAC) ont été analysés par le LHN de l'ANSES sur des échantillons d'eau brute constitués de 2 x 1 L en verre brun. A noter que les eaux des captages de Dontrien, Souain Perthes-les-Hurlus et Neufchâtel-sur-Aisne ont été analysées pour la recherche des ions chlorate et perchlorate sur les eaux brutes et les eaux traitées. Les Eaux de Javel de chloration des eaux brutes de Dontrien et Souain ont aussi été analysées pour ces deux paramètres. L'objectif étant d'apprécier l'apport éventuel en ions perchlorate dans les eaux distribuées par les procédés de chloration. La Javel n'a pas été analysée à Neufchâtel, la chloration s'y effectuant par chloration directe (apport de Cl_2).

Ont été recherchés de façon systématique, des ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-), puis de façon plus ponctuelle, d'autres ions inorganiques susceptibles d'accompagner les ions chlorate et perchlorate dans la composition des matières énergétiques de la Grande Guerre (NO_3^-, NH_4^+, etc.). Les cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, etc.) et anions (Cl^-, F^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}, etc.) majeurs ont aussi été dosés sur certains échantillons (en Argonne, à Vauquois et dans les Vosges) afin d'identifier d'éventuelles anomalies hydrochimiques susceptibles d'être en lien avec ClO_4^-, ClO_3^-, NO_3^-, NH_4^+. Au Lingekopf et à La Chapelotte, le panel analytique a été complété sur certains points anomaliques par des éléments traces (métalliques, anioniques et cationiques).

Enfin les composés organiques énergétiques (NAC, avec leurs impuretés, adjuvants, et leurs sous-produits de transformation environnementale) ont été généralement recherchés sur les points d'eau reconnus significativement anomaliques en ClO_4^-. La recherche des NAC caractéristiques des explosifs usuellement utilisés par les parties belligérantes durant la Grande Guerre a d'abord été entreprise avant 2020 en faisant appel aux moyens analytiques alors disponibles, ceux du laboratoire spécialisé Envilytix GmbH basé à Wiesbaden en Allemagne. Les méthodes analytiques appliquées sur les eaux étaient celles de la norme DIN ISO 22478 (chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP) avec détection UV) et, pour certains sous-produits de transformation environnementale (acide nitrobenzoïques) et les NAC polaires (nitrophénols) les méthodes développées dans le cadre du projet européen KORA (TV5)[2016] sur l'atténuation naturelle des composés énergétiques organiques, dont les résultats furent publiés en 2008. Les compétences analytiques du Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES furent mobilisées à compter de 2020, permettant par-là de diminuer significativement les limites de quantification au laboratoire (passant de 100 $ng.L^{-1}$ à quelques $ng.L^{-1}$ ou dizaines de $ng.L^{-1}$ selon les composés dosés). Les protocoles analytiques du LHN sont ceux appliqués pour la caractérisation des poudres et explosifs après lixiviation et décrits à la Section 1h du volet historique du présent manuscrit.

Les résultats analytiques obtenus dans le cadre des différentes études sectorielles sont rassemblés dans les tableaux de l'Annexe I du présent manuscrit.

[2016] Joos, A. (2008). KORA, *op. cit.*

3.1.4 Recherche des origines des ions perchlorate et des composés d'origine pyrotechniques (*Forensie* environnementale[2017]). Approche isotopique

Comme cela a été explicité à la Section 1h du présent manuscrit, les ions perchlorate peuvent avoir deux origines distinctes (i) une origine synthétique (le $NaClO_4$ est produit par électrolyse de solutions concentrées de $NaClO_3$, elles-mêmes générées par électrolyse de saumures NaCl sous haute intensité), (ii) une origine naturelle dans les nitrates ($NaNO_3$) importés du Chili depuis la moitié du XIXe siècle jusque dans l'entre-deux-guerres pour l'amendement de la culture intensive de la betterave et du blé et comme source d'azote combiné pour l'industrie de l'acide nitrique (HNO_3).

Ces deux catégories de perchlorate possèdent des signatures isotopiques (abondances relatives des isotopes stables du chlore (^{37}Cl et ^{35}Cl) et de l'oxygène (^{18}O, ^{17}O et ^{16}O) dans les ClO_4^-) distinctes. La mesure de ces abondances permet donc de discriminer les deux origines. La signature isotopique ^{18}O, ^{17}O et ^{16}O à $\delta^{17}O = 0$ signe une origine synthétique et les différentes valeurs de $\delta^{18}O$ caractérisent des sources d'ions perchlorates synthétiques distinctes. Lorsque $\delta^{17}O > 0$, tout ou partie des ions perchlorate est d'origine naturelle (comme ceux des nitrates de l'Atacama (Chili)). Une tendance $\delta^{37}Cl$ et $\delta^{35}Cl$ croissante témoigne de processus de biodégradation impliquant les ions perchlorate.

Un échantillonnage particulier a été réalisé dans le cadre des différentes études sectorielles sur certains points d'intérêt (notamment ceux marqués par de fortes concentrations en ions perchlorate et des NAC) dans le but de préciser les origines des ions perchlorate. Pour pouvoir réaliser ce type d'analyse, il est nécessaire de disposer (i) d'une masse en ions perchlorate suffisante par échantillon (ii) d'échantillons contenant sélectivement que des ions perchlorate.

L'échantillonnage a été réalisé à cet escient, sur des eaux moyennant un protocole permettant d'enrichir sélectivement en ions perchlorate une colonne filtrante de résine échangeuse d'ions (*Amberlite*). La masse critique nécessaire pour l'analyse isotopique, à accumuler dans la colonne est de 10 $mgClO_4$. Le temps de pompage à hauteur d'environ 2 $L.min^{-1}$ (débit assurant un temps de transit dans la colonne pour garantir la totale adsorption des ions perchlorate) a été adapté en durée aux concentrations reconnues ou pressenties en ions perchlorate au niveau de chaque point d'échantillonnage afin d'obtenir cette masse critique. Ces durées théoriques ont été généralement allongées dans un souci de garantir l'atteinte des masses critiques (compte tenu des incertitudes concernant les fluctuations des concentrations en ClO_4^- au niveau du point échantillonné). Entre 140 et 900 L d'eau (calculés à partir des concentrations attendues dans les eaux) ont circulé dans les résines à un débit compris entre 0,5 et 2 $L.min^{-1}$, ce qui a nécessité entre 1,5 et 10 heures de pompage en fonction des points.

Avant de pénétrer dans la résine, une préfiltration de l'eau a été nécessaire. En pratique, un système constitué de deux cartouches filtrantes (20 µm et 5 µm) montées en série a été installé entre la sortie de la pompe et la résine (entre les vannes 2 et 4, cf. Figure 379). Le débit et les paramètres physico-chimiques ont été contrôlés toutes les 20 minutes (à la sortie 1) et les cartouches filtrantes ont été changées toutes les deux heures afin d'éviter un colmatage. Après les prélèvements, les colonnes de résine (laissées saturées en eau) ont été bouchées à leurs deux extrémités, puis conservées à une température d'environ 4°C pour *in fine* être envoyées dans une glacière au laboratoire de l'université « *Texas Tech* » aux Etats-Unis afin d'extraire et purifier les ions perchlorates concentrés dans les résines. Les solutions obtenues après extraction ont ensuite été envoyées au laboratoire de l'université du Delaware (USA) pour les analyses.

[2017] Il s'agit de l'ensemble des recherches et des outils permettant de déterminer l'origine et/ou la datation des pollutions environnementales.

Les abondances relatives des isotopes stables du chlore (^{37}Cl et ^{35}Cl) et de l'oxygène (^{18}O, ^{17}O et ^{16}O) dans les ClO_4^- ont été mesurées en utilisant un spectromètre de masse (IRMS, pour *isotope-ratio mass spectrometry*) selon les protocoles décrits dans Hatzinger et al., (2011)[2018] et Bohlke et al., (2017)[2019]).

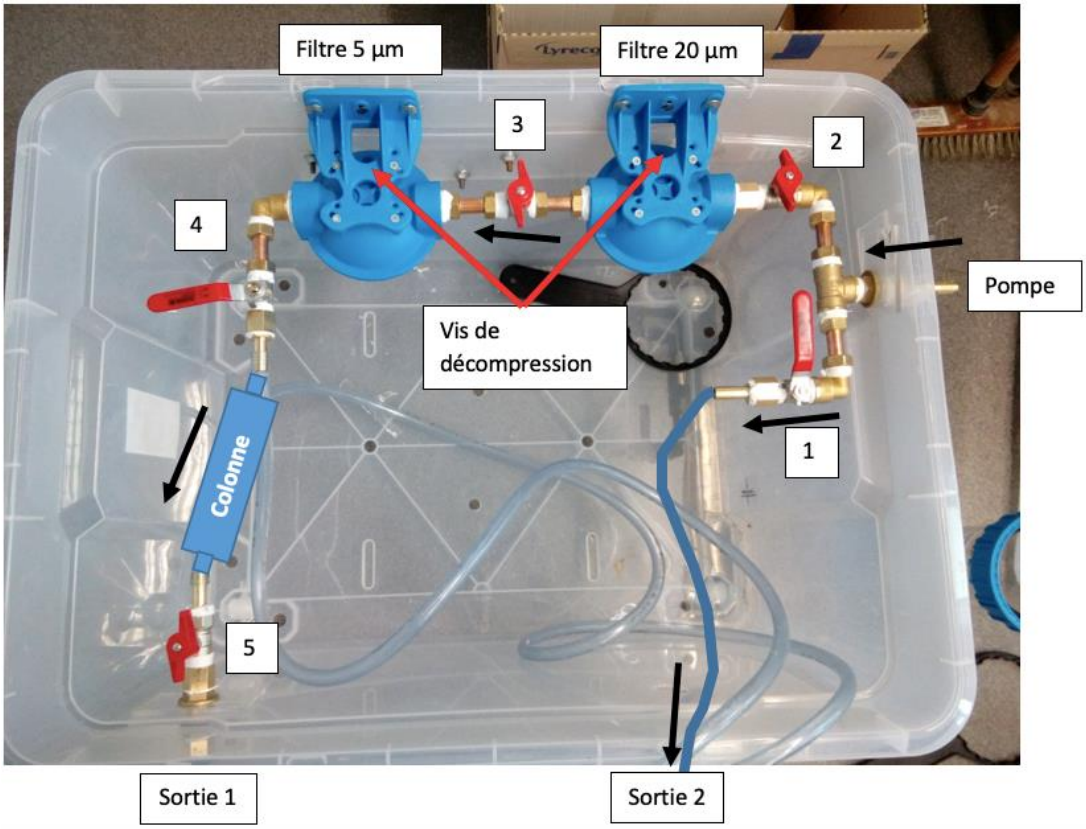


Figure 379: Système de prélèvement pour l'analyse isotopique des perchlorates.

On rappelle ici que le nombre d'échantillons susceptible d'être confié pour analyse au laboratoire des isotopes stables de O, Cl des ions ClO_4^- est fortement contraint par des considérations budgétaires (3 500 US$ l'analyse, temps de prélèvements très importants).

A noter que les analyses isotopiques $\delta^{15}N$, $\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$ des ions nitrates (NO_3^-) ont aussi été réalisées dans 10 échantillons d'eau des sources des secteurs de l'Argonne et de Vauquois afin de pouvoir comparer les signatures isotopiques mesurées dans les eaux avec celles mesurées dans des explosifs (dont de nombreux échantillons provenant de ces deux secteurs) (cf. Section 1h du volet historique du présent manuscrit).

[2018] Hatzinger, Paul B. Shaw Environmental Inc. Lawrenceville (2011). *Using Stable Isotope Ratio Analysis to Distinguish Perchlorate Sources*.

[2019] Böhlke, J. K., Mroczkowski, S. J., Sturchio, N. C., Heraty, L. J., Richman, K. W., Sullivan, D. B., & Hatzinger, P. B. (2017). *Stable isotope analyses of oxygen (^{18}O: ^{17}O: ^{16}O) and chlorine (^{37}Cl: ^{35}Cl) in perchlorate: reference materials, calibrations, methods, and interferences. Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 31(1). 85-110.

Les points d'eau échantillonnés pour les analyses des isotopes stables O, Cl de ClO_4^-, réalisées dans le cadre spécifique de cette recherche, sont listés dans le Tableau 69 (soit un total de neuf points de mesure).

Point	Commune	Département	Justification	Typologie
FP5. Source BSS000KHTQ / 01347X0023/SO	Lachalade, lieudit « Four-de-Paris »	Marne	Concentrations élevées en ions perchlorate, anciennes lignes de front et site de guerre de mines.	Source non captée. Nappe de la Gaize.
Hohrod. Source Obergunsbach BSS000YVRH / 03418X0062/S2	Hohrod	Haut-Rhin	Concentrations élevées en ions perchlorate, champ de bataille du Lingekopf.	Source AEP captée, eaux brutes. Nappe de socle altéré.
Allencombe n°4. Source BSS000UTKB / 02706X0048/HY	Badonviller	Meurthe-et-Moselle	Concentrations élevées en ions perchlorate et NAC, champ de bataille de La Chapelotte, site de guerre de mines.	Source AEP captée, eaux brutes. Nappe des Grès du Trias inférieur.
Cramont Puits BSS000DERG / 00333X0043/F2	Cramont	Somme	Concentrations élevées en ions perchlorate et occurrence de NAC avec une signature singulière. Environnement agricole (culture betteravière). Proximité d'un site de destruction de REG.	Puits AEP, eaux brutes. Pompage intermittent. Nappe de la Craie.
Perthes. Puits BSS000KGZD / 01337X0001/FAEP	Souain Perthes-les-Hurlus	Marne	Concentrations élevées en NAC et perchlorate, secteur actif du front de Champagne et environnement agricole (dont la culture betteravière). Proximité d'un secteur de guerre de mines (Perthes) et de sites de destruction de REG.	Puits AEP / eaux brutes. Nappe de la Craie.
Dontrien. Puits SS000KGQX / 01332X0008/F1	Dontrien	Marne		Réservoir AEP / eaux brutes. Nappe de la Craie. Pompage intermittent.
Dormoise Rivière. Lavoir	Rouvroy Ripont	Marne	Concentrations élevées en perchlorate, sources de la rivière situées dans le camp de Suippes, secteur actif du front de Champagne et présence de sites de destruction de REG.	Rivière, eaux de surface.
Neufchâtel. Puits BSS000HKGF / 01081X0013/F	Neufchâtel-sur-Aisne	Aisne	Concentrations élevées en NAC et perchlorate, et environnement agricole (betterave sucrière). Anciennes arrières lignes allemandes.	Réservoir AEP / eaux traitées. Nappe de la Craie. Pompage intermittent.
Mainvillers. Puits BSS000WCKT / 02936X2002/PFAEP	Mainvilliers	Loiret	Concentrations élevées en ions perchlorate. Environnement agricole (betterave sucrière).	Puits AEP, eaux brutes. Nappe des Calcaire de Beauce (entre 105 et 109 m de profondeur).

Tableau 69 : Points échantillonnés pour l'analyse isotopique des ions perchlorate.

Afin d'environner les points de mesure visant spécifiquement des secteurs géographiques concernés directement ou indirectement par la Grande Guerre, le jeu de données a été complété par des résultats de mesures isotopiques :

- Provenant d'une base de données nord-américaine mise à disposition pour les besoins de cette recherche par N. Sturchio de l'université du Delaware (USA). Ces données correspondent aux couples $d^{18}O$ versus SMOW (‰) / $D^{17}O$ versus SMOW (‰) pour (i) 79 échantillons de perchlorates d'origine synthétique parmi lesquels des réactifs (sels de perchlorate purs), des perchlorates de torches et feux d'artifice, des perchlorates de défoliants, de poudre à canon et d'eau souterraine polluée (de sites industriels de production et de bases militaires), (ii) 50 échantillons de perchlorates des nitrates du Chili, et (iii) 55 échantillons de perchlorates naturels non Atacama, de zones arides à travers le monde (déserts californiens, texans, de Namibie, de Chine, de l'Antarctique, etc.), soit 184 points de mesure ;

- Des eaux d'un puits AEP (Le Malesherbois) de la Beauce, de Mainvilliers (Loiret), marqué par de fortes concentrations en ions perchlorate (comprises entre 28 et 32 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ en 2019) et localisé en environnement d'agriculture intensive, notamment celle de la betterave sucrière ; cet échantillonnage et ces analyses ont été réalisés spécifiquement dans le cadre de cette recherche ;

- Six résultats (dont cinq concernant des eaux souterraines et un concernant les eaux de surface de la rivière Py) provenant des travaux de recherche sur les origines des ions perchlorate marquant les eaux souterraines dans le secteur est Rémois (département de la Marne) (secteur de Moronvilliers) mené par F.F. Cao en 2018 et 2019 sous l'encadrement du BRGM. Ces données sont publiées[2020] ;

- Cinq échantillons d'eau souterraines collectés en 2019 et marqués par des concentrations élevées en ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-, localement et selon le régime des eaux > 1 000 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$) ; ces ions sont en relation avec une pollution historique au droit et en aval d'un ancien site industriel de production de sels perchloratés. Deux échantillons supplémentaires ont été constitués : il s'agit d'éluats de sols très fortement impactés par les sels de perchlorate provenant de ce site industriel. Ces perchlorates sont de synthèse. Le site a volontairement été laissé anonyme ;

- Cinq échantillons (dont un échantillon de source, un échantillon d'eau superficielle et un échantillon d'un captage AEP) provenant d'un secteur marqué par une pollution diffuse par les ions perchlorate aux faibles concentrations (généralement < 7 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$) ; le secteur a volontairement été laissé anonyme ;

- Trois échantillons proviennent d'un site actuel de production de sels de chlorate et de perchlorate. Il s'agit (i) d'un échantillon de liqueur (saumure) d'électrolyse chlorate (ii) d'un échantillon de liqueur d'électrolyse perchlorate et (iii) des sels de $NaClO_4$ obtenu après électrolyse de la dernière liqueur. Le site industriel a volontairement été laissé anonyme ;

[2020] Cao, F., Sturchio, N. C., Ollivier, P., Devau, N., Heraty, L. J., & Jaunat, J. (2020). *Sources and behavior of perchlorate in a shallow Chalk aquifer under military (World War I) and agricultural influences. Journal of Hazardous Materials,* 398, 123072.

- Ont également été exploités dans le cadre de cette recherche les résultats des mesures isotopiques obtenus sur des éluats d'explosifs de la Grande Guerre collectés en Argonne à savoir T58 (explosif perchloraté français de projectile d'artillerie de tranchée de type 58T « Crapouillot »), HG3 (explosif nitré de grenade à manche allemande), Perdite 1, Perdite 2 correspondant à deux échantillons d'explosifs nitrés nitratés perchloratés allemands provenant d'une charge souterraine de guerre de mines abandonnée (Argonne, secteur de la Haute-Chevauchée).

Les résultats des analyses isotopiques obtenus dans le cadre des différentes études sectorielles sont rassemblés dans les tableaux de l'Annexe J du présent manuscrit.

3.2. L'ARGONNE ET LA BUTTE DE VAUQUOIS

En Argonne se trouvent maintes tombes
Les étoiles célestes étincèlent au firmament
En Argonne pleurent dans le vent
Les âmes mortes qui nous ont quitté.

Max Barthel, poète du front[2021]

3.2.1 Contexte géographique et géomorphologique. Un territoire au relief marqué

Le territoire de l'Argonne reste difficile à délimiter avec précision. L'Argonne est située sur la bordure ouest du Bassin parisien, entre la Côte de Champagne (à l'ouest) et la cuesta Barroise (à l'est). Au nord, l'Argonne dépasse les Côtes Meusiennes sans atteindre la vallée de la Meuse. Au sud, elle se termine au niveau de la Champagne humide et du Perthois. Ce territoire situé à cheval sur les départements de la Marne à l'ouest et celui de la Meuse à l'est assure la transition entre la Champagne et la Lorraine. Il présente un relief tantôt vallonné, tantôt plus aplani, avec cependant des secteurs plus escarpés. Dans ce relief, le massif de la Gaize (« le plateau d'Argonne ») qui s'étend du nord au sud entre les vallées de l'Aisne, de la Bar et de l'Aire, se détache très nettement.

La lentille de Gaize résistante formant ce massif culmine vers + 270 m NGF à la Haute-Chevauchée (à la côte dite « 285 » près de l'ossuaire du même nom). Avec ses 20 km de large pour 100 km de long, il apparaît à l'ouest sous la Craie glauconieuse, pour s'élever ensuite en pente douce à l'est où il est déchiqueté par des ravins et vallées profondes, en entablements massifs et abrupts. Ces ravins de 50 à 100 m de profondeur sont globalement orientés sud-ouest / nord-est. Ils ont été creusés par de très nombreux ruisseaux alimentés par un très grand nombre de sources.

Le massif est partagé en deux par la vallée encaissée de la Biesme qui décrit un large coude vers l'ouest à Vienne-le-Château, avant son confluent avec l'Aisne. Au sud de ce massif, l'Argonne présente un faciès au relief moins varié, permettant la présence de nombreux étangs. Au nord-est, la crête de Sommauthe forme un petit relief séparant l'Argonne de la vallée de la Meuse. Plus basse à l'ouest, l'altitude augmente petit à petit en allant vers l'est, avant d'atteindre la vallée de la Meuse. A l'est du cours de l'Aire, des buttes témoins du massif de la Gaize ont été préservées et dominent le plateau comme celle de Vauquois, ou encore de Montfaucon.

Le secteur de l'Argonne (et ses sous-secteurs) et celui de la butte de Vauquois sont localisés et délimités sur la Figure 381 et la Figure 399. Le secteur d'étude principal (Argonne Four-de-Paris / Haute-Chevauchée) couvre une superficie d'environ 9 x 7 km (63 km^2).

[2021] Cité dans Buchner, A. (1999). *Der Kampf um Vauquois. Band III*. p. 5.

3.2.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Contexte général

Le territoire de l'Argonne s'inscrit dans la structure monoclinale du Bassin parisien. Il est structuré par des couches sédimentaires d'âge secondaire présentant un pendage des couches d'environ 2% orienté sensiblement d'est en ouest. La formation de la Gaize, épaisse de 80 m et résistante à l'érosion, arme la cuesta albienne qui domine la vallée de l'Aire. Le rebord de la côte, souvent très abrupt, surplombe de 80 à 100 m la surface du toit du Jurassique (attribué au Portlandien). Cette pente au pied de côte s'adoucit au contact des Sables Verts et des Argiles de Gault de l'Albien inférieur et moyen, souvent masqués par des formations superficielles (colluvions ou par les alluvions anciennes des terrasses de l'Aire). A cheval entre les plaines crayeuses de la Champagne, et les plateaux calcaires de l'est, l'Argonne présente une surélévation due à l'affleurement de la Gaize (grès glauconieux à spicules d'éponges cimenté par de l'opale) de l'étage Albien (Crétacé). Elle repose sur des Argiles de Gault elle-même surmontant la formation des Sables verts (glauconieux) attribués elle aussi à l'Albien (Crétacé inférieur). Le triptyque géologique Gaize, Argiles de Gault et Sables verts est caractéristique du territoire argonnais.

La formation de la Gaize d'Argonne

La formation de la Gaize d'Argonne (ou Gaize de Vouzier) est une roche détritique et chimique siliceuse (65 à 85% de SiO_2) attribuée à l'Albien supérieur (Crétacé inférieur). Elle est majoritairement composée de débris organiques (spicules de spongiaires, des radiolaires et des tests calcaires mal conservés d'ammonite, de lamellibranches, d'échinodermes et de foraminifères), de quartz détritique, de glauconie, d'argile (smectite prédominante) et d'un ciment d'opale (silicarénite gris vert fine). La fraction minérale est complétée par des cristaux de plagioclases, de muscovite et des grains carbonatés. Elle se présente comme une roche légère (du fait de sa porosité), gris vert à gris beige très clair, perméable et souvent fracturée en blocs décimétriques à proximité de la surface (la Gaize est en effet gélive) et présente généralement une faible résistance mécanique. Elle renferme aussi de nombreux accidents siliceux parfois disposés en bancs, ce qui donne alors à la Gaize une couleur gris foncé à noire. Les faciès gris non oxydés, peuvent contenir de fines concrétions pyriteuses. La Gaize peut présenter différents aspects et faciès selon l'argilosité de la roche, l'occurrence plus au moins dense d'accidents siliceux, etc. On distingue ainsi la Gaize noduleuse, argileuse, lenticulaire ou massive (Fauvel, (1984)[2022] ; Fauvel et Petit, (1984)[2023]; Laurain et al., (1998)[2024]). L'épaisseur de la formation diminue de 85 m au sud à 65 m au nord.

La transition vers son mur est progressive. La Gaize repose en effet sur les Argiles de Gault par l'intermédiaire d'une dizaine de mètres de gaize argileuse relativement imperméable. Cette couche, épaisse d'environ 15 m se caractérise par de larges enclaves argileuses métriques à décamétriques aux contours irréguliers et allongés parallèlement à la stratification. Il s'agit de récurrences du faciès Gault sous-jacent. La partie supérieure, plus grossière, montre des stratifications obliques et apparaît moins consolidée, voire sableuse. Les Argiles de Gault affleurent dans le secteur d'étude dans la vallée de la Biesme, au débouché des ravins du massif argonnais et plus à l'est dans la vallée de l'Aire. Elles forment le glacis de la butte témoin de Vauquois constituée de Gaize (cf. Figure 380).

[2022] Fauvel, P.J. (1984). Approche sédimentologique de la Gaize d'Argonne (France). Note présentée au 5e Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille, page 165.

[2023] Fauvel, P.J. et Petit, G. (1984). Sédimentation argilo-carbonatée du Crétacé moyen de Champagne (France). Note présentée au 5e Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille, page 166.

[2024] Laurain, M., Menillet, F. et Pluchery. E. avec la collaboration de Duermael, G., Fauvel, P.J. et Thévenin, S. (1998). Notice de la Carte Géologique au 1/50 000 n° 134 Feuille de Monthois. BRGM Ed. 56 p.

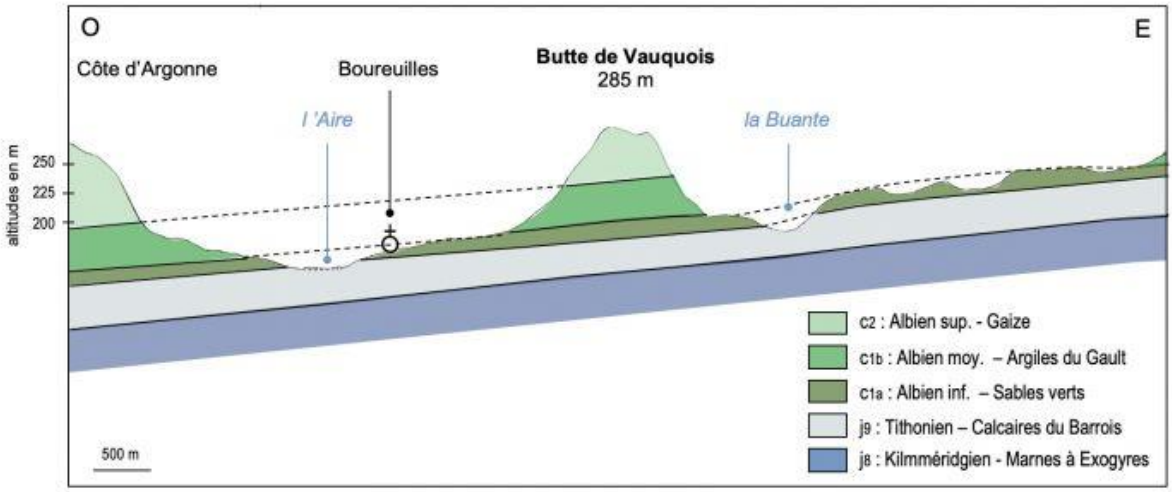


Figure 380 : Coupe géologique simplifiée (ouest – est) du versant est du massif de l'Argonne et de la butte témoin de Vauquois[2025].

Près du toit de la formation, les spongiaires sont bien conservés, formant ainsi un niveau repère qui jalonne la surface structurale du revers de l'Argonne. La Gaize est surmontée par les Sables verts supérieurs attribués au Cénomanien inférieur (Crétacé supérieur).

Le pied des escarpements de la Gaize d'Argonne sont empâtés par d'épaisses formations de bas de versant, comprenant des masses glissées, des « *heads* » (formations de solifluxion riches en blocs) et des colluvions, d'une épaisseur pouvant atteindre une dizaine de mètres.

Le caractère gélif, finement fracturé de cette roche tendre, offrent des facilités au creusement dans cette épaisse formation, qui peut être aisément investie depuis les pentes des escarpements formés par la Gaize. Ces particularités géologiques et géomorphologiques expliquent en partie pourquoi, très tôt dans la guerre (automne 1914), les deux parties (front franco-allemand) prirent l'initiative d'attaques souterraines par des sapes puis des galeries de mines, puis pourquoi cette guerre des mines prit, à Vauquois comme en Argonne (Haute-Chevauchée, Fille Morte, Corniche, Four-de-Paris, etc.), de telles intensités et extensions.

[2025] D'après les cartes géologiques BRGM n°134 Feuille Monthois et n°135 Feuille Verdun au 1/50 000. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip.

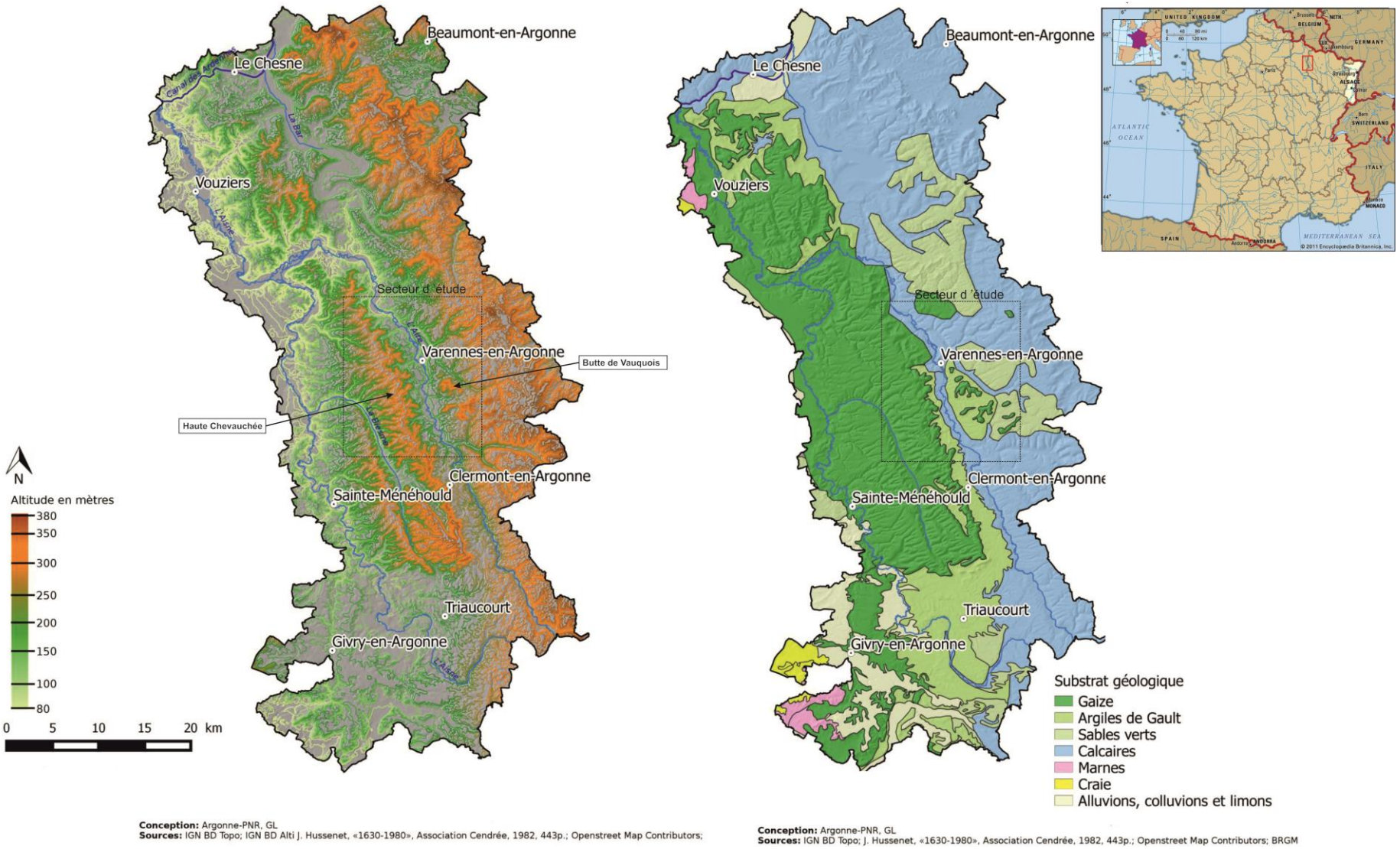


Figure 381 : Géomorphologie et géologie de l'Argonne. Localisation du secteur d'études.

Un système hydrogéologique anthropisé

L'ensemble géologique argonnais forme le réservoir de deux aquifères : la Gaize elle-même, qui est une roche capable de se gorger d'eau, et les karsts du Portlandien (Jurassique supérieur) dans lesquels l'eau circule après infiltration, avant de ressurgir sous forme de sources. Le cœur de l'Argonne, entre les rivières Aisne et Aire, bien qu'à proximité immédiate de la vallée de la Meuse, fait partie du bassin versant de la Seine.

La « « nappe de la Gaize » (Gaize du Cénomanien (Code 017)) siège dans la Gaize d'Argonne. Il s'agit d'un réservoir mixte de fissures et de porosité. La circulation de l'eau est donc interstitielle et fissurale avec en outre des circulations préférentielles dans les interbancs associées aux variations verticales de perméabilité. Les différents faciès (avec des argilosités différentes) peuvent contrôler des comportements hydrauliques contrastés. La perméabilité (conductivité hydraulique) varie de 10^{-2} à 10^{-4} $m.s^{-1}$. Les débits spécifiques connus se situent dans la fourchette de 1 à 8.10^{-4} $m^3/s/m$[2026]. Les hauteurs mouillées sont faibles (cf. Figure 382), de l'ordre de 5 à 10 mètres. Dans ces secteurs, le niveau des eaux souterraines s'établit à environ 40 et 60 m de profondeur.

La piézométrie de la nappe de la Gaize n'est pas connue ; elle épouse toutefois sensiblement la topographie et sa pente générale qui est dirigée d'est en ouest ; les vallées et thalweg constituent des axes de drainage. Le relevé des sources fait apparaître dans la Gaize d'Argonne des niveaux moins perméables, l'un vers la cote moyenne de + 195 m NGF, l'autre vers + 175 m NGF sur le versant occidental du massif. Une ligne de sources apparaît également au pied des pentes occidentales à proximité du contact entre les alluvions de la Biesme et la Gaize vers la cote + 150 m NGF, notamment autour du Four-de-Paris, Lachalade et La Harazée. Les écoulements s'opèrent depuis les contreforts de la vallée de l'Aire à l'est, vers la vallée de la Biesme à l'ouest. La ligne de source n'est pas celle du contact entre la Gaize et les Argiles de Gault, mais au contact entre la Gaize *sensu stricto* et les couches de transition de la base de la formation de la Gaize. Ces sources de déversement sont très nombreuses, notamment dans la partie ouest du massif et en tête des principaux ravins. Elles constituent les exutoires de la nappe et alimentent les affluents de la Biesme vers l'est et de l'Aire / Aisne vers l'ouest. Certaines d'entre elles furent aménagées en captage pour alimenter en eaux les troupes en campagne durant la Grande Guerre. La nappe de la Gaize ne fait pas l'objet d'usage d'EDCH mais peut servir de ressource d'appoint pour certaines communes rurales.

A la Haute-Chevauchée tout comme à Vauquois, le creusement des mines profondes nécessita de dénoyer le réservoir aquifère de la nappe de la Gaize pour y creuser au sec par d'ingénieux systèmes de pompage alimentés par des groupes électrogènes. Cet environnement naturel hydrogéologique fut alors complètement bouleversé. La structure du milieu souterrain, héritée de millions d'années de processus naturels, fut profondément modifiée par l'activité guerrière. Les détonations souterraines contribuèrent à fissurer encore plus avant la roche (cf. Figure 383), augmentant ses capacités d'emmagasinement, les perméabilités et par conséquent définirent de nouvelles vitesses d'écoulement selon d'autres directions préférentielles. Ces directions sont celles des couloirs où eurent lieu les explosions (comme sur la croupe de la Haute-Chevauchée – de direction nord-est / sud-ouest – entre le ravin des Courtes-Chausses au sud et celui du ruisseau de la Fontaine des Meurissons au nord) mais possiblement aussi celles des galeries et chantiers souterrains aujourd'hui ennoyés. La géométrie des couloirs de fracturation et des systèmes de galeries contrôle vraisemblablement les écoulements par des directions préférentielles. Cette géométrie et le degré d'interconnexion entre ces systèmes et ces fractures, difficiles à établir, ne sont pas caractérisés à ce stade des recherches.

[2026] Agence de l'Eau Rhin Meuse. *Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse* (octobre 2002).

Les profondeurs atteintes étaient d'environ 60 m et 95 m pour respectivement les secteurs de la Haute-Chevauchée et Vauquois. Lorsque les chantiers souterrains furent abandonnés en 1918, les pompages d'exhaure cessèrent et les eaux souterraines reprirent leur niveau quasi-naturel, ennoyant les systèmes de galeries profondes.

Les écoulements des eaux d'avant-guerre ne sont possiblement plus ceux d'aujourd'hui, néo-écoulements qui restent à l'heure actuelle méconnus, que ce soit en Argonne ou sur d'autre secteur front occidental en proie à la guerre de mines. Les vastes entonnoirs d'explosion et la pulvérisation de la roche par les détonations à leur base sont des facteurs favorables à l'infiltration des eaux météoriques, précisément à l'emplacement des anciennes charges souterraines ayant renfermé de grandes quantités d'explosifs. Comme le démontra Hupy et al., (2011)[2027], la cratérisation des surfaces topographiques favorise l'infiltration et l'alimentation des eaux souterraines par les eaux météoriques, se traduisant par une élévation des niveaux statiques post-bellum.

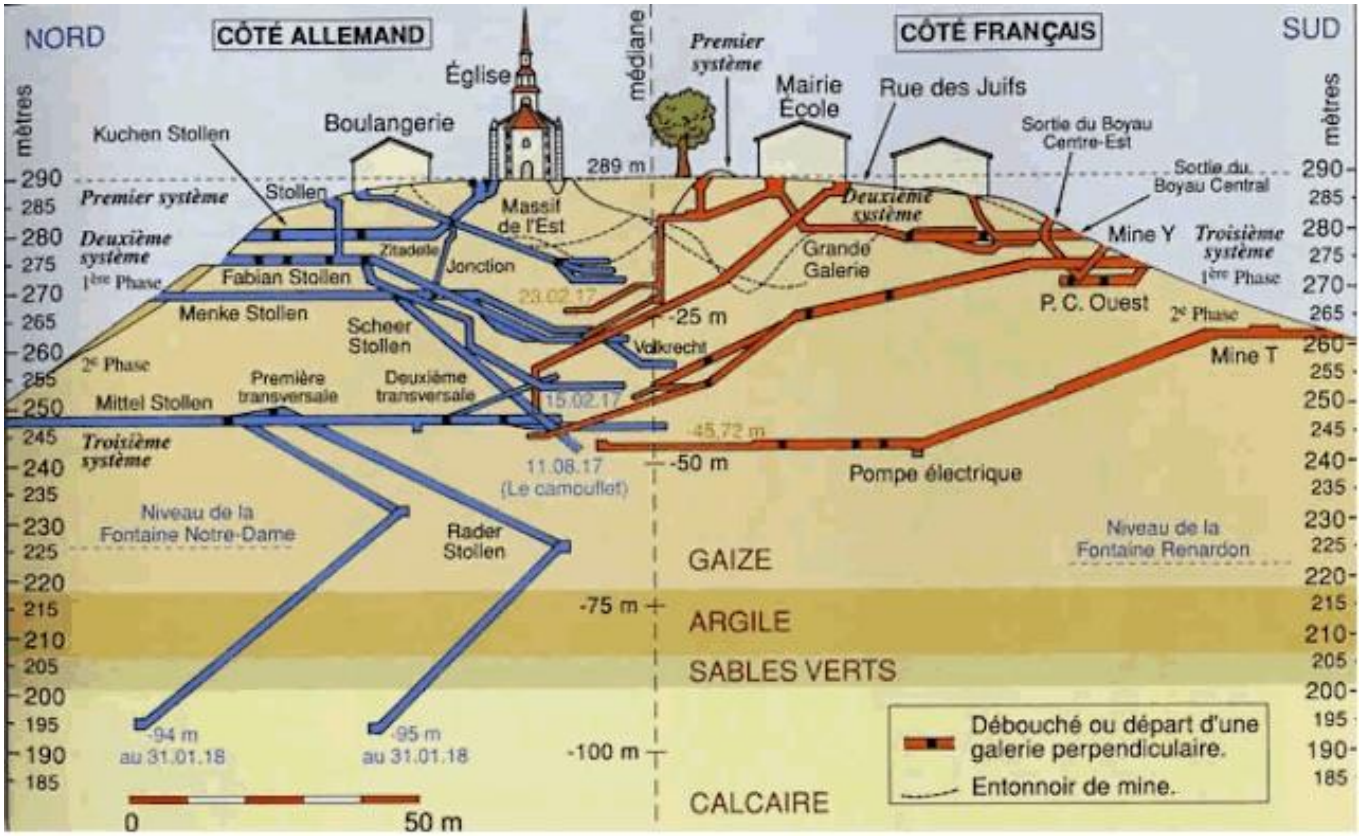


Figure 382 : Coupe hydrogéologique simplifiée de la Butte de Vauquois et organisation des systèmes de galeries de mines français (flanc sud, à droite) et allemands (flanc nord, à gauche)[2028].

Contexte hydrochimique

Les eaux de la nappe de la Gaize sont moyennement minéralisées (avec des gammes de conductivités électriques de 500 à 600 µS.cm-1). de faciès bicarbonaté calcique, de dureté moyenne à assez élevée (titre hydrotimétrique oscillant de 25 à 37°F)[2029]. Des concentrations excessives et naturelles en fer et en manganèse ont été localement relevées.

[2027] Hupy, J.P., Koehler, T. (2011). *Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape*, op cit.

[2028] © Association des Amis de Vauquois et sa Région. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip

[2029] Agence de l'Eau Rhin Meuse. *Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse*, op. cit.

Figure 383 : a) Descenderie allemande fortement inclinée (Fille Morte, Argonne). b), c) Galeries descendantes, système allemand A3 (Haute-Chevauchée). d) Galerie descendante ennoyée. A noter à gauche, les vestiges d'une tuyauterie d'aération. Système allemand. Vauquois est, e) Galerie dont l'extrémité est ennoyée. Système allemand A3 (Haute-Chevauchée), f) Cadre en bois à l'entrée d'un puits ennoyé. Vauquois est, g) Bancs de Gaize fracturés, diaclasés et déplacés. Des restes d'étais et cadres de bois ayant aménagés et consolidés les galeries sont encore visibles.

3.2.3 Contexte historique

Singularité du front argonnais

L'Argonne constitue un territoire singulier sur l'ancienne ligne de front de 1914-1918. Charnière entre les fronts particulièrement actifs de la Champagne à l'ouest et de Verdun à l'est, le front d'Argonne fut caractérisé par de violents combats en 1915 après que les forces françaises et allemandes aient enfin pris l'initiative de s'installer en forêt fin 1914. Les principaux combats s'y livrèrent, notamment pour la prise et le contrôle de points hauts stratégiques comme la butte de Vauquois et l'arrête du massif argonnais (Haute-Chevauchée, Fille Morte, Côte 285). Après 1915, l'Argonne resta un « secteur calme du front » où les combats se résumèrent en surface à des embuscades, échauffourées, coups de main dans un environnement de combat particulier, celui de la forêt en terrain escarpé, puis sous terre par une guerre de mine défensive. Il s'agit, avec le massif des Vosges, du seul secteur où les combats furent menés en forêt et sur terrains escarpés. Pendant toute la durée de la guerre, aucun succès ou défaite majeur ne vient ensuite modifier les positions de manière décisive. La clé de voûte de l'Argonne ne rompit pas, et la ligne de front resta presque inchangée jusqu'en 1918. Le front d'Argonne ne fut réactivé qu'en septembre 1918 à la faveur de l'offensive américaine Meuse-Argonne.

Mise en place du front et des forces en Argonne (1914)

Après la déroute sanglante de la bataille des frontières d'août 1914, la IIIe Armée du général Sarrail et la IV^{e}Armée sous le commandement du général Langle de Cary furent forcées à la retraite qui les menèrent en direction du sud depuis le secteur de Sedan vers Verdun. Elles étaient poursuivies par la IV^{e}Armée wurtembergeoise et la Ve Armée prussienne, sous les commandements respectifs du Roi du Wurtemberg et du *Kronprinz* Wilhem, fils de l'Empereur Guillaume II (cf. Figure 384). Le massif forestier au relief escarpé de l'Argonne, longtemps considéré comme impénétrable par des armées en mouvement, fut d'abord délaissé. L'Argonne était un repoussoir pour les organisateurs des opérations militaires, un nom qui résonnait aux oreilles des militaires comme « *une impraticable et mystérieuse forêt dans laquelle on ne pouvait point se battre*[2030] », un lointain souvenir des guerres révolutionnaires. Le môle argonnais de direction méridienne détermina les axes de progression des armées et l'orientation verticale du front entre la Meuse et la Marne à la veille de la bataille de la Marne [2031]. Cette barrière sépara les adversaires. Le Ve Corps d'Armée prussien pénétra finalement l'Argonne en marchant vers l'ouest pour établir la jonction entre les deux armées et poursuivre les Français vers le sud.

Depuis son aile droite, les troupes allemandes engagèrent le combat en Argonne, afin d'atteindre depuis le versant nord-est du massif la vallée de la Biesme à travers les reliefs escarpés du Bois de la Gruerie et de Bolante. Les Allemands étaient motivés par un objectif sur cette partie du front « *L'objectif de l'ennemi en Argonne est la possession de la voie ferrée et de la route de Châlons à Verdun par les Islettes et Clermont, localité située au passage des deux voies dans les vallées de la Biesme et de l'Aire* [2032]». Il s'agissait de pouvoir contrôler une voix stratégique logistique française majeure alimentant Verdun. Les Allemands cherchèrent d'abord à pénétrer dans les deux vallées par des poussées en direction du Four-de-Paris et La Harazée entre octobre 1914 et mai 1915 ainsi que sur Vauquois, La Haute-Chevauchée pour la possession des hauteurs. La pression allemande se fit très forte pour tenter de gagner le Four-de-Paris et les points hauts.

[2030] Albert-Joseph Tanant (Général). *La Troisième Armée dans la bataille. Souvenirs d'un chef d'Etat-Major*, Paris, La Renaissance du livre.

[2031] Amat, J.P. (2015). *Les Forêts de la Grande Guerre*, *op. cit.*

[2032] Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Groupement z. 9e Division. Génie. Rapport du Chef de Bataillon, Commandant le Génie de la 9e D.I. Le 10 juillet 1916. Signé : Arlabosse.

Le point haut de la butte de Vauquois occupé par le 2e R.I. fut abandonné aux Allemands dès le 24 septembre 1914 sous la menace d'une manœuvre d'encerclement. Les premiers contacts entre Français et Allemands semblent avoir eu lieu sur la voie de la Haute-Chevauchée (Cote 285) le 25 septembre 1914. De nombreuses attaques furent durement repoussées sur la Cote 285, sur la crête de la Fille Morte et sur la route de la Haute-Chevauchée. Les troupes françaises installèrent peu à peu leurs positions défensives pour faire face.

Du 14 au 24 septembre, la stabilisation du front s'opéra en Argonne par soubresauts [2033], selon une ligne qui s'étendait depuis l'est avec la Côte 285, la Fille Morte, Bolante, les flancs de la vallée de la Biesme au nord-est de La Harazée jusqu'au nord de la route de Vienne-le-Château à Servon-Melzicourt (actuelle RD266). Mais hormis les grands couloirs de communication, « *l'Argonne forestière reste vide des troupes qu'elle a vues défiler à deux reprises – et dans les deux sens – sur ses marges*[2034] ». A cette date rien n'était encore entrepris pour établir la jonction entre les IIIe et IVe Armées françaises. La forêt fut finalement investie par les troupes et leur matériel fin septembre 1914 lors des « *mouvements confus qui précèdent la fixation des fronts*[2035] ».

A la mi-octobre 1914, les Allemands rassemblèrent depuis Metz des unités placées sous le commandement du XVIe Corps d'Armée du Général Bruno von Mudra (cf. Figure 384), afin de concentrer les efforts militaires sur des positions françaises bien ciblées. L'Argonne fut d'entrée de jeu placée côté allemand sous un commandement unique.

En novembre 1914, le front occupé par le Ve Corps d'Armée fut réorganisé en trois secteurs (cf. Figure 386 et Figure 387):

- Le secteur ouest (« Argonne ouest »), couvre un front étendu de près de 8,5 km de longueur entre la vallée de la Biesme, le Four-de-Paris à l'ouest et la Côte 263 à l'est de la Haute-Chevauchée (cf. Figure); les Français divisèrent ce secteur en secteur ouest (Corniche, Bolante, comprenant aussi les Grandes Courtes-Chausses) et secteur est (la Fille Morte, la Haute-Chevauchée et les Petites Courtes-Chausses)[2036] ;

- Le secteur centre, s'étend en fond de vallée de l'Aire entre la Haute-Chevauchée à l'ouest et la butte de Vauquois à l'est;

- Le secteur est (« Argonne est »), long de 5,5 km, comprend la région des Allieux, de Vauquois et du Pont des Quatre Enfants (dans la vallée de l'Aire à l'est de Vauquois).

Entre décembre 1914 et la mi-janvier 1915, le front d'Argonne se vit renforcé côté français par ladite « Légion garibaldienne ». Ces « Chemises rouges », formant une unité militaire française de la Légion étrangère (4e Régiment de marche du 1er Etranger) étaient composées de volontaires italiens, parmi lesquels six petits-fils de Garibaldi.

[2033] Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée. Etat-Major. 2e Bureau. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

[2034] Amat, J.P. (2015). *Les Forêts de la Grande Guerre*, *op. cit.*

[2035] *Ibid.*

[2036] Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée. Etat-Major. 2e Bureau. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Figure 384: Karl Bruno Julius Mudra, au premier plan et au centre, en haut à gauche le Kronprinz, fils de Guillaume II, à la tête de la Ve Armée[2037].

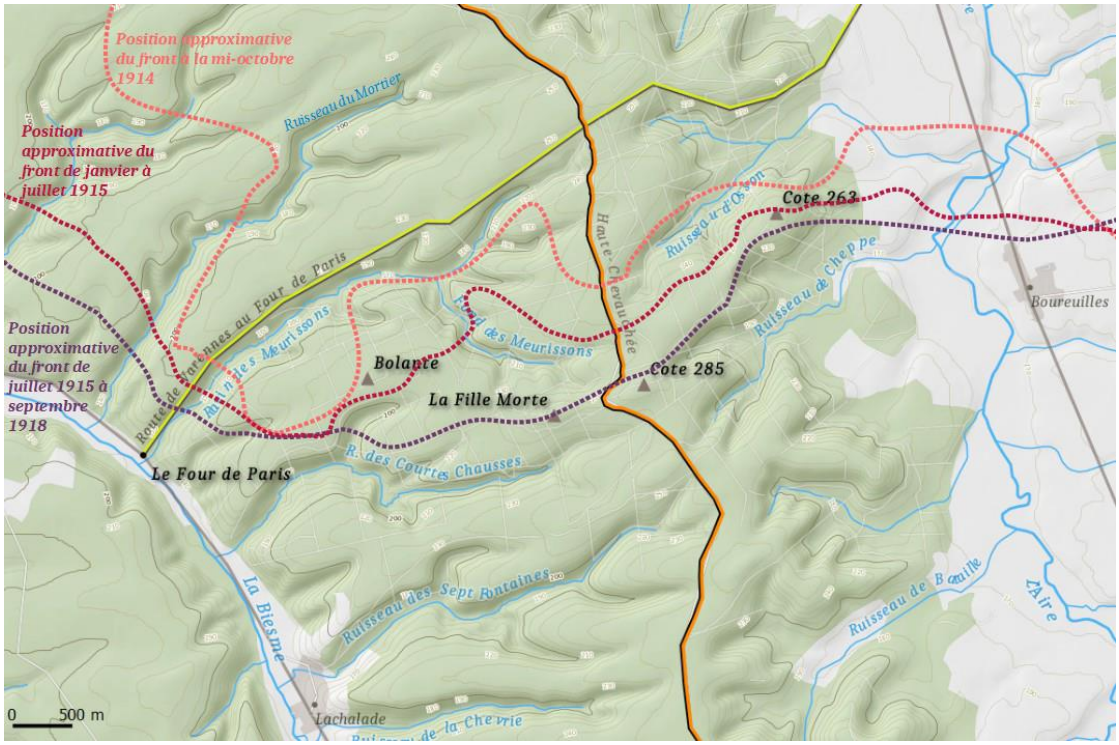


Figure 385 : Position et évolution du front argonnais[2038].

[2037] http://www.memoires-champagne-ardennes.com/ardennes/apremont-sur-aire/index.html Mémoire Champagne Ardenne. Apremont-sur-Aire.

[2038] Projet de classement du site de guerre de la Haute-Chevauchée. Rapport de présentation. Extrait.

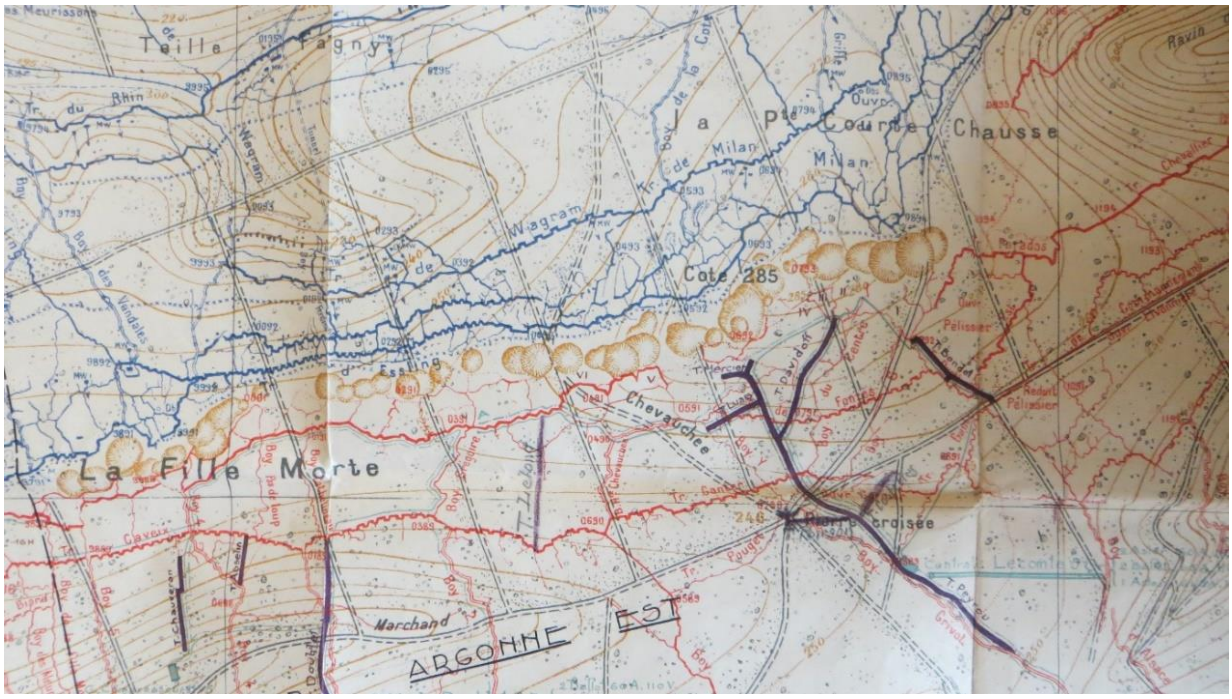


Figure 386 : Canevas de tir français d'Argonne est (la Fille Morte, la Haute-Chevauchée et les Petites Courtes-Chausses) (1915)[2039].

Figure 387 : Canevas de tir français d'Argonne ouest (Corniche, les Grandes Courtes-Chausses) (1915)[2040].

[2039] Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Canevas de tir.

[2040] *Ibid.*

La lutte pour le promontoire de Vauquois. 1914 et l'épisode des grands assauts

Tandis que se déroulèrent ces combats en forêt d'Argonne, le Ve Corps (9e et 10e Divisions françaises) attaquait à son tour dans la vallée de l'Aire et se lança à l'assaut du village de Vauquois, perché sur une butte qui commandait et dominait toute la vallée et dont les Allemands avaient fait un centre de résistance et un observatoire de tout premier ordre pour surveiller (et donc pilonner par l'Artillerie) la voie ferrée stratégique reliant Châlons à Verdun. Un premier assaut français fut ordonné le 28 octobre 1914. Sans aucune préparation d'artillerie, les fantassins du 46e R.I. à peine sortis du couvert forestier furent fauchés par les mitrailleuses et les tireurs adverses bien embusqués. Une pluie d'obus de gros calibre termina de disperser les derniers survivants. Ce premier face-à-face violent dura moins de trente minutes. L'opération fut reconduite les deux jours suivants se soldant aussi par des échecs. Elle permit néanmoins d'occuper deux corps de bâtiment en ruine de la ferme de la Cigalerie située au pied de la butte, constituant un poste d'observation avancé. Les opérations se poursuivirent le 8 décembre 1914. L'assaut fut confié aux deux régiments de la IXe D.I. Menés au prix de lourdes pertes, les derniers assauts furent mis en échec par les tirs de mousqueterie intenses, mais surtout la présence d'un réseau dense de fils de fer barbelés mis en place par les Allemands. Des escouades de troupes du 1er Régiment du Génie, intercalées dans celles de l'Infanterie, avaient eu pour mission de pratiquer des passages pour les colonnes d'assaut au moyen de cisailles, mais aussi de charges explosives rigides allongées. Les tentatives françaises pour percer en Argonne et à Vauquois se révélèrent infructueuses.

Le recours à d'anciennes tactiques obsidionales en Argonne : la guerre de mines

- **Un choix tactique dicté par l'environnement des combats**

Les attaques frontales sur les points de défense français ayant été jugées trop risquées, les Allemands entreprirent de déloger les Français par l'usage des attaques souterraines. Ces troupes allemandes de la garnison de Metz renfermaient des unités du Génie (*Pionniere*) aguerris à la guerre souterraines menée par sapes ou galeries d'attaque. Le terrain escarpé et la géologie (terrains formés de Gaize) étaient en effet favorables au creusement d'abris et tranchées profonds et à l'usage de sapes et de souterrains de combats de la guerre de mines.

Côté français, tirant leçon du nouvel échec de l'assaut pour prendre la butte de Vauquois, le haut commandement français échafauda alors aussi de son côté de nouvelles tactiques offensives et des plans tactiques ambitieux, dignes du maréchal de Vauban, « le preneur de villes ». Selon un schéma déjà appliqué en Argonne, la forteresse de Vauquois devait être investie en conjuguant (i) l'assaut de l'Infanterie, (ii) le bombardement par de l'artillerie de siège de très gros calibre mais surtout (iii) l'action de la sape et de la mine. Le pouvoir de destruction des puissantes charges souterraines (fourneaux) permettait d'ouvrir des brèches dans le dispositif adverse, en compensant les insuffisances de l'artillerie lourde.

Un autre facteur bien spécifique à l'Argonne motiva le recours à la guerre de mine : les conditions du combat en environnement forestier *« L'Argonne ! On s'est battu là comme on ne s'est battu nulle part. Sous le couvert impénétrable des arbres, dans l'ombre tôt venue des nuits, la lutte a eu là sa marque propre ; car la guerre des bois n'est pas la guerre des plaines. Ici les deux tranchées adverses se touchent presque, s'imbriquent, s'entrelacent et se nouent*[2041] *».*

[2041] *La Guerre 1914-1918 en Argonne*. Paris, Comité commémoratif de l'Argonne, fasc. 1, 1970.

Les combats en forêt sur un terrain escarpé fait de plateaux profondément entaillés par des ravins, revêtirent un caractère particulier : lenteur de la progression due à la présence d'obstacles à la marche, impossibilité des déploiements en ligne ou sur un front de colonne. Une grande confusion accompagna aussi les premiers combats en Argonne. Source d'angoisse chez les combattants, le sous-bois sombre et la présence du relief étaient propices aux embuscades et à la préparation discrète d'offensives surprises. L'ennemi invisibilisé, se cachait dans d'épais taillis. Les escouades et sections, privées de contacts visuels entre elles et de repères, étaient souvent laissées à leurs propres initiatives. La lutte fut aveugle. La guerre prit des allures de guérilla. Embuscade, coups-de-main et fusillades se multiplièrent avec des portées souvent inférieures à 50 m, se concluant souvent par des corps-à-corps. Les troupes et états-majors n'étaient pas préparés à ces situations « *les tacticiens cherchent fébrilement, improvisent souvent les réponses afin de limiter, ou d'éviter, les combats sous couvert. On n'attaque pas un bois, sauf si l'on est contraint ; on le déborde, on le manœuvre* [2042]».

En forêt, l'appui de l'Artillerie était inefficace faute de pouvoir ajuster les tirs sur des cibles bien identifiées et visibles. Par ailleurs, les arbres et le relief n'autorisaient pas le recours aux tirs tendus des artilleries de campagne et lourde, on leur préféra les tirs d'artillerie de tranchée à trajectoires paraboliques, d'engins majoritairement chargés d'explosifs chloratés et perchloratés côté français. Avec des moyens d'artillerie insuffisants, de puissance et de précision trop limitées pour espérer percer efficacement le front, l'adversaire resta inabordable par la surface. Cette situation militaire combinée à un terrain escarpé contrôlé par une géologie faite de roches tendres, renfermant une nappe relativement profonde (vers 40 à 60 m sous les crêtes) orientèrent tout naturellement les états-majors au recours à la guerre de mines offensive. Au Lingekopf, dans les Hautes-Vosges, un massif lui aussi escarpé et forestier fut aussi en 1915 le théâtre d'opérations militaires, mais les roches trop dures du socle granitique en profondeur et celles non consolidées et trop tendres, trop peu épaisses et irrégulières des arènes d'altération en surface, n'offraient aucune perspective d'attaque prometteuse par la mine. A La Chapelotte, autre secteur de guerre de mines inclus dans la présente recherche, des roches dures furent investies par les chantiers souterrains, celles des formations des Grès et Conglomérats du *Buntsandstein* (Trias germanique inférieur). L'avantage à La Chapelotte ne revenait pas à celui qui creusait le plus discrètement mais le plus rapidement au moyen d'engins pneumatiques bruyants (perforateurs et marteaux-piqueurs).

- **La guerre de mines en Argonne**

La particularité de la guerre de mines en Argonne, comparativement à d'autres secteur du front occidental, était que celle-ci ne s'était pas concentrée, comme à Vauquois, autour d'un point particulier du terrain disputé à l'adversaire, mais elle s'était étendue sur près de 4 kilomètres, formant un chapelet d'entonnoirs isolés ou plus au moins adjacents et coalescents ou encore emboîtés. Cette ligne globalement orientée est-nord-est / ouest-sud-ouest, matérialise le « *no man's land* » entre les premières lignes françaises au sud et allemandes au nord.

Cette guerre de mines fut en effet en Argonne « *d'une activité exceptionnelle*[2043] » notamment suite à la note SC/n°5631 du 10 février 1915, par laquelle « *le Général Commandant l'Armée prescrivit de commencer immédiatement des travaux de mine dans tous les C.A. et D.I* [2044]» en vue d'attaquer les lignes ennemies (déclinaison offensive de la guerre de mines) et de protéger ses propres positions (déclinaison défensive de la guerre des mine).

[2042] Amat, J.P. (2015). *Les Forêts de la Grande Guerre*, *op. cit.*

[2043] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Mémoire concernant les opérations de guerre de mine à la IIe Armée (Notre SC/n°994 du 10 avril 1915 de M. Le Général Commandant l'Armée). Au GQG, le 30 avril 1915.

[2044] *Ibid.*

La Figure 388 donne des aperçus photographiques de scènes de guerre de mines (entonnoirs de la butte de Vauquois, explosion d'un fourneau, sapeurs et *Pionniere*).

Les premières détonations souterraines furent allemandes et datées de la fin 1914 dans le secteur de la Corniche[2045]. Durant l'hiver, les combats furent incessants sur le front de la Haute-Chevauchée. Face à l'inefficacité des attaques d'Infanterie, le combat à la mine, initié dès le mois d'octobre en Argonne, se développa sur le secteur : le 8 décembre 1914, les sapeurs français firent exploser à Bolante deux contre-mines pour se défendre des sapes allemandes.

Les offensives souterraines françaises visèrent les observatoires (points hauts) et les points d'appui des positions fortifiées adverses (*Stützpunkte*). Le but tactique fut « *la destruction de ces organes, qui sont à la surface du sol et d'où l'ennemi à des vues sûres et étendues sur nos organisations* [2046]». Depuis les observatoires O9, de la Fille Morte de la Haute-Chevauchée et de la Côte 285, les Allemands prenaient à revers les organisations françaises. En 1915, les Allemands eurent recours à la tactique de la guerre de mines sur un large front « *pour préparer leurs offensives successives [….] et pour ouvrir un passage, étapes par étapes, à leurs troupes d'assaut à travers les lignes françaises préalablement bouleversées par les explosions*[2047] ».

[2045] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Mémoire concernant les opérations de guerre de mine à la IIe Armée (Note SC/n°994 du 10 avril 1915 de M. Le Général Commandant l'Armée). Au GQG, le 30 avril 1915.

[2046] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Ordre particulier pour le commandement du Génie de la 9e D.I. GQG, le 20 juin 1916. Signé Tirrier.

[2047] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée, Etat-Major. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Vue aérienne oblique de la butte de Vauquois (vers l'ouest). A droite des entonnoirs, les lignes allemandes. Non daté (> 1916)[2048].

Troupes du Génie allemandes « Pionniere » posant à l'entrée d'une galerie. Non daté[2049].

Projection des terrains soulevés par l'explosion d'un fourneau allemand. Non localisé, non daté[2050].

Sapeurs-mineurs français à l'entrée d'une galerie. Non localisé, 1915[2051].

Figure 388 : La guerre de mines en Argonne. Aperçu photographique.

[2048] © R.W. Rennick Collection-McMahan photo. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip

[2049] http://humanbonb.free.fr/indexSf.html. L'inscription sur le fronton de l'entrée de la galerie « *Glück Auf !* » est un salut traditionnel du mineur germanique, qui apporterait au salué la chance de découvrir de nouveaux filons de minerais.

[2050] https://argonne1418.com/photos-depoque/guerre-des-mines/#jp-carousel-106.

[2051] http://palimpsestes.fr/centenaire/photos/argonne2/Images/gourbi_jpg.jpg.

1915, tentative de percée du front en Argonne et l'intensification de la guerre de mines

- **Les combats de janvier 1915**

A partir de janvier 1915, les offensives d'ampleur reprirent et la guerre de mines s'intensifia. « *Pendant les 3 premiers mois de 1915, entre le Four-de-Paris et la Vallée de l'Aire, les sapeurs français exécutèrent plus de 3 000 mètres de galeries de mines, firent exploser 52 fourneaux dont les charges avaient demandé 7 200 kilos d'explosifs*[2052] ». Le 5 janvier 1915, une explosion massive provoquée par les Français près du ravin des Courtes-Chausses fit voler en éclats 800 mètres de tranchées allemandes. La riposte fut immédiate et violente sur un large front, du ravin des Meurissons jusqu'à la Cote 263. Elle donna lieu à cinq jours de combats très éprouvants et très meurtriers, dans la pluie et le froid.

Les Allemands intensifièrent alors les attaques en direction des positions françaises en déportant leurs efforts sur la ligne de crête marquée par la route de la Haute-Chevauchée, dont la possession leur permettait de tourner Vauquois et les défenses de la vallée de la Biesme et leur donnait le contrôle et la maîtrise des vallées. L'accès à ces positions était barré par les positions françaises de la Côte 285 et de la Fille Morte.

Les « chemises rouges » des Garibaldiens furent lancées contre les positions allemandes à Bolante. Le 8 janvier, les Allemands se ruèrent sur la lisière de Bolante. Du 8 au 11 janvier 1915 les Chasseurs à pieds silésiens et hessois étaient aux prises avec les 31e, 46e, 76e et 89e R.I. appuyés par les Garibaldiens dans de violents combats en forêt. Le bois de la Gruerie, cible de l'assaut du 29 janvier, fut rebaptisé comme souvent dans la Grande Guerre « *Bois de la Tuerie* » par les Français. Mal armés, ceux-ci ne parvinrent pas à répliquer et leur moral amorça une chute libre. Les Allemands n'avaient pas atteint la vallée de la Biesme mais avaient creusé une poche profonde et étroite dans les lignes françaises en direction du Four-de-Paris (cf. Figure 385). Au nord de cette poche se dessinait un saillant français dans les positions allemandes (dénommé le « saillant de la Fontaine-Madame »).

La percée allemande fut évitée, mais de part et d'autre les pertes étaient énormes ; l'Armée française perdit, outre quelques centaines de mètres de terrain, plusieurs milliers d'hommes, dont bon nombre de ses officiers. Le dispositif militaire français fut revisité à l'issue de ces combats, plaçant, à l'instar des Allemands, l'Argonne sous le commandement unique du général Sarrail.

Le printemps 1915 connut une certaine accalmie des combats, qui permit de conforter le système défensif. Les moyens humains et matériels furent renforcés côté français, équilibrant progressivement les forces sur le terrain. Le renforcement des positions défensives et le calme relatif furent à ce moment-là, des leviers de plus pour accentuer les efforts en matière de guerre souterraine. La première explosion allemande se produisit le 10 mars 1915. Le 14, un fourneau français fonctionna à partir d'une galerie superficielle, à 3 m de profondeur, et créa un entonnoir de 8 m de diamètre, dont les lèvres furent immédiatement occupées par les fantassins. L'explosif était livré et transportées à dos d'homme depuis le dépôt du Génie, par caisses de 25 kg. Le 13 avril 1915, la détonation de 400 kg d'explosif chloraté *Cheddite* détruisit, à partir d'un rameau d'une galerie superficielle à 6 m de profondeur, 20 mètres linéaires de la parallèle de départ allemande. De février à juillet 1915, 56 fourneaux de mine consommèrent 9,66 tonnes d'explosif dans le secteur de la Côte 263.

[2052] Bibliothèque nationale de France. *Verdun. Argonne (1914-1918).*

- **Attaquer sur un large front. Le point d'orgue des assauts du 13 au 20 juillet 1915.**

En juin et juillet 1915, le commandement allemand renonça aux attaques partielles et locales en Argonne, décida de mener des attaques sur des fronts de 3-4 km à grands renforts d'hommes et de matériel. Les Allemands attaquèrent d'abord le flanc nord (le 20 juin 1915) puis le flanc est (le 2 juillet 1915) du saillant de la Fontaine-Madame. Le 20 juin 1915, deux divisions prussiennes et wurtembergeoises se ruèrent sur le Bois de la Gruerie après une préparation d'artillerie mettant en œuvre de nombreux projectiles chimiques. Les fantassins du 32e Corps résistèrent. Jusqu'au 28 juin, les contre-attaques françaises réussirent à reprendre une partie du terrain perdu. Le 30 juin les Allemands étendirent leur offensive jusqu'au nord du Four-de-Paris et s'avancèrent jusqu'à 8 km de la gare des Islettes, leur objectif. Le 2 juillet 1915, la préparation d'artillerie des Allemands redoubla de violence ; elle visa la 42e D.I. française qui résistait.

Les Allemands ne purent s'emparer de la vallée de la Biesme malgré l'importance de leur engagement militaire sur ce secteur du front. En juillet 1915, le front, dans les secteurs de Bolante et de la Fille Morte, suivait la croupe qui domine le ravin des Meurissons, recoupait à angle droit le chemin de la Haute-Chevauchée, englobant les points dominants de la Côte 285 et de la Côte 263. Depuis cette ligne pourvue de bons observatoires, les Français étaient en mesure de prendre à revers les lignes allemandes établies devant le Four-de-Paris. Une offensive dans cette direction initialement organisée pour le 11 juillet 1915 fut repoussée au 14 juillet. Mais les Allemands devancèrent les Français et attaquèrent finalement le 13 juillet 1915. Précédés par une préparation d'artillerie de près de 50 000 obus et par l'explosion de plusieurs mines, cinq régiments du Corps de Metz de Von Mudra se lancèrent à l'assaut des positions françaises, débouchant de sapes pratiquées à courte distance des tranchées françaises. Aidés par des bombardements à l'artillerie lourde les Allemands progressèrent, les Français cédèrient. Les réserves du Ve Corps et le VIe Bataillon de Chasseurs contre-attaquèrent depuis les ravins sans préparation d'artillerie et reprirent sous les tirs nourris une partie de la première ligne. La contre-offensive permit de fixer le front dans le nord de l'Argonne sur la ligne Servon-Varennes-en-Argonne.

Les pertes furent lourdes. Ces quelques journées de lutte firent plus de 8 000 victimes du seul côté français sur le secteur. Plus globalement, entre janvier et juillet 1915, les pertes militaires françaises en Argonne s'élevèrent à 82 000 hommes, soit la moitié de la IIIe Armée. Entre le 20 juin 1915 et le 20 juillet 1915, les deux Corps d'Armée opérant en Argonne (le Ve et le 32e C.A.) avaient perdu 26 420 hommes au point que le 32e C.A., épuisé, fut relevé début août 1915 par le Xe C.A., renforcé par la 128e D.I. Le général Sarrail, rendu responsable après enquête, fut relevé de son commandement et remplacé par le général Humbert dont l'ardeur fut réfrénée par le général De Castelnau afin que la IIIe Armée adopta l'attitude défensive qui s'imposait.

Le désastre de l'offensive française de diversion du 25 septembre 1915

L'Argonne était un pivot entre le front de Verdun à l'est et celui de Champagne à l'ouest. Il fut activé et réactivé selon les évènements militaires sur ces deux fronts. Dès le 12 juillet 1915, la IIIe Armée du général Sarrail fut informée qu'elle devra coopérer aux opérations programmées plus à l'ouest, en couvrant le flanc droit de la grande offensive française prévue en Champagne, au moyen d'une attaque locale de diversion entre l'Aisne et le massif forestier de l'Argonne. L'objectif était de fixer les Allemands pour empêcher l'envoi de renforts vers la Champagne. Mais au moment où la IIIe Armée fut investie de cette mission, elle s'avéra affaiblie par de nombreuses pertes et des reculs sur le terrain faisant suite à la série d'attaques allemandes de juin (20 et 30 juin) et juillet (1er et 2 juillet et 13 juillet). Les Allemands poursuivirent le creusement et l'organisation de nouveaux chantiers souterrains. C'était fin juillet 1915 « *qu'ont pris naissance les organisations de mines en face desquelles nous nous trouvons à la côte 285, à la Fille Morte et sur le plateau des Courtes-Chausses* ».

Les Français se livrèrent aux préparatifs de l'offensive prévue en septembre 1915 en creusant trois parallèles reliées par des boyaux. Ces préparatifs s'étendirent sur un front d'environ 2 km de long. Mais les travaux n'avancèrent pas à la vitesse escomptée. En plein préparatif de l'offensive d'Argonne ouest, les Allemands attaquèrent à l'est, le 8 septembre 1915 dans le Bois de la Gruerie. Le Xe C.A. perdit 4 300 hommes dont 2 000 prisonniers, obligeant les Français à colmater le front au détriment des préparatifs. L'attaque désorganisa non seulement les travaux mais également le commandement. Surmené, le général Wirbel (commandant le Xe C.A.) craqua nerveusement et demanda à être relevé de ses fonctions pour se reposer. Il fut remplacé le 10 septembre 1915 par le général Anthoine auquel succède le général Delbousquet (alors à la tête de la XXe D.I.). Rien n'était prêt en Argonne ouest qui subit le calendrier de l'offensive de Champagne. Le 25 septembre 1915, 9H15, il fallut attaquer simultanément à l'offensive en Champagne engagée plus à l'ouest entre Massiges, Tahure, Souain, par les IIe et IVe Armées, un assaut précédé par une préparation d'artillerie qui, dans un premier temps, s'avéra efficace. D'abord couronné de succès, le bon ordonnancement de l'offensive se grippa. Les Allemands enclenchèrent un tir de barrage bien préparé stoppant net l'élan français, qui butta aussi sur des réseaux de barbelés intacts. Et derrière, selon la formule consacrée « ça ne suit pas ». La montée au front des vagues de soutien et le flux des blessés des arrières lignes obstruèrent les boyaux. Immobilisés, les Français s'exposèrent à la manœuvre, la contre-attaque de flanc. L'opération de diversion fut un échec.

1916 – 1918. Le rééquilibrage des forces et le déclin de la guerre souterraine

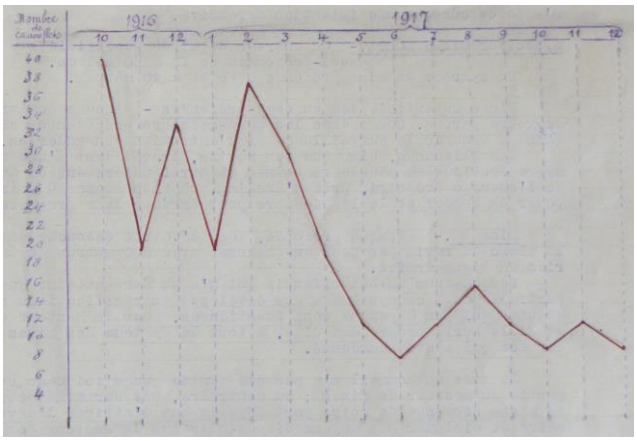
En Argonne, comme ailleurs sur le front occidental, sur un front de 15 km, les combats de 1914 et 1915 menés dans les forêts ne permirent à aucun des deux camps de prendre l'ascendant et de prétendre à des gains territoriaux significatifs.

La guerre de mines se poursuivit en profondeur après l'arrêt des assauts en surface. Du 1er octobre 1915 au 30 juin 1916 (sur le front de la IXe D.I.) les Allemands firent fonctionner 36 camouflets et 56 charges offensives avec entonnoirs contre 81 et 50 côté français. L'activité de guerre de mines prit en 1916 des dimensions violentes inédites à Vauquois. Le 3 mars 1916, une première grosse mine allemande avec quatre tonnes d'explosif explosait à l'est de la butte tuant onze soldats français. Les Français répliquèrent le 23 mars en faisant exploser sous la position fortifiée allemande de l'église, 12 tonnes d'explosifs, tuant 30 hommes. Le 14 mai 1916 les Allemands firent exploser à l'ouest le plus gros fourneau ayant fonctionné à Vauquois, totalisant quelques 60 tonnes d'explosifs, détruisant et ensevelissant une partie des premières et secondes lignes françaises et 108 soldats. L'explosion fut ressentie à plusieurs kilomètres à la ronde et creusa un cratère de plus de 25 mètres de profondeur et 100 mètres de large encore bien visible de nos jours (cf. Figure 390).

D'abord pris de vitesse et dépassés par les Allemands dotés d'importants moyens humains et matériels, l'équilibre des forces dans cet affrontement souterrain se rétablit peu à peu durant le second semestre de 1916, avec aussi la première opération de mine offensive française à la Fille Morte.

Les charges des fourneaux devinrent aussi, avec l'approfondissement des chantiers, de plus en plus puissantes pour espérer générer les destructions et les entonnoirs en surface aux emplacements et dimensions escomptés. Les eaux de la nappe phréatique de la Gaize furent rabattues par des pompages d'exhaure pour permettre le creusement au sec. Sous Vauquois, ces travaux furent conduits jusqu'à 90 m de profondeur (par rapport au sommet de la butte) et environ 50 m en Argonne. Les chantiers s'organisèrent en plusieurs étages (en Argonne, mine superficielle < 15 m, mine intermédiaire ou semi-profonde entre 15 et 30 m de profondeur et mine profonde au-delà de 30 m de profondeur), totalisant plusieurs dizaines de kilomètres de galeries. Des puits verticaux et descenderies (rampes inclinées) permettaient d'atteindre rapidement de la profondeur.

A la mi-1916, les Allemands renoncèrent à poursuivre leur offensive en Argonne, abandonnant aussi les préparations d'attaque par l'usage de la mine, « *l'époque paraît passée où la mine jouait un rôle prépondérant dans la préparation des attaques*[2053] ».



Les explosions en surface avec entonnoirs, de plus en plus rares n'avaient alors plus à visées offensives mais étaient destinées à approfondir le fossé (fait d'enfilades d'entonnoirs coalescents) séparant les tranchées adverses. Ce fossé était clairement défensif. En janvier 1918, les seules activités de mine étaient concentrées à la Côte 285 et à la Fille Morte.

Figure 389 : Nombre de camouflets français donnés entre octobre 1916 et décembre 1917[2054]*.*

Le nombre de camouflets français donnés mensuellement entre octobre 1916 et décembre 1917 chuta drastiquement de 40 à 8, le nombre étaient directement dépendant de l'activité souterraine allemande (cf. Figure 389).

Des moyens humains et matériels considérables furent alloués à la guerre de mines. En date de janvier 1917, environ 4 000 hommes étaient affairés à ces opérations du côté français pour des résultats peu convaincants. Les chantiers furent maintenus actifs et entretenus pour parer à d'éventuelles offensives ennemies, toujours possibles. Allemands comme Français imaginèrent en 1917 araser la butte de Vauquois par l'usage de fourneaux énormes (de plus d'une centaine de tonnes), placés dans les systèmes de mines profondes. Aucun des deux belligérants, faute de moyens, ne parvint à ses fins.

En avril 1918, la guerre des mines cessa à Vauquois. En mai-juin 1918, des troupes italiennes relevèrent les troupes françaises, remplacées à leur tour par les troupes américaines, qui s'emparèrent de la butte le 26 septembre 1918, précédées par un pilonnage d'artillerie allié qui détruisit de nombreuses entrées de galeries. La butte fut prise, après une résistance acharnée d'une petite garnison de la garde impériale allemande. Les Allemands abandonnèrent lors de leur retraite dans leurs souterrains leur munitions, explosifs et matériels, en ayant pris le soin par ailleurs de dynamiter les entrées des galeries et de piéger par des charges certains tronçons de galeries.

Pour de plus amples informations concernant les évènements historiques à Vauquois durant la Grande Guerre, et en particulier la guerre de mines, j'invite le lecteur à consulter les ouvrages de référence de Buchner, A. (1982). *Der Minenkrieg auf Vauquois*, Buchner, A. (1998). *Der Kampf um Vauquois. Band I. Vom Kriegsausbruch bis zum Beginn der « Zweiten Schlacht um Varennes » am 22. September 1914*, et Buchner, A. (1999). *Der Kampf um Vauquois. Band III.*

[2053] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, Archives du Génie, cote GR 2V218. XIIIe Corps d'Armée, Etat-Major. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

[2054] *Ibid.*

Figure 390 : Vue aérienne oblique de la butte de Vauquois de nos jours, vue vers l'est. A droite au premier plan, l'entonnoir de l'explosion allemande de mai 1916. A gauche, les premières lignes allemandes, à droite au niveau du monument « au marronnier » les premières lignes françaises. Ce monument se tient à l'emplacement du marronnier – arbre de la Liberté – qui se dressait sur la place du village détruit[2055].

Des quantités d'explosifs stockées sous terre et utilisées inconnues

Les quantités totales d'explosifs utilisées et/ou stockées sous terre pour mener la guerre de mines en Argonne comme à Vauquois ne sont pas connues au regard des archives consultées. Ces secteurs furent ébranlés par plusieurs centaines de détonations de fourneaux de plus en plus puissants au fur et à mesure que les chantiers de mines offensives s'approfondissaient entre fin 1914 et 1916. Les plus fortes charges entrées en détonation atteignirent 60 tonnes, à Vauquois en mai 1916. Les Français usèrent principalement d'explosifs de type *Cheddite*, à base de sels de chlorate (renfermant une fraction de sels perchlorates en impuretés), alors que les Allemands utilisèrent essentiellement des explosifs nitrés nitratés dits « de sureté » de différentes formulations. Un total de plusieurs centaines de tonnes d'explosifs utilisés semble une évaluation approximative raisonnable.

3.2.4 Abandon sous terre de matériel de guerre au terme des confrontations chtoniennes

Contexte et sources d'information

Des documents d'archive et des constats archéologiques attestent de l'abandon en 1918 par les troupes allemandes et françaises, des travaux et galeries souterrains exploités pour la guerre de mines. Elles quittèrent ces systèmes en les abandonnant tels quels ou en prenant soins d'en interdire l'accès en dynamitant les entrées, en obstruant certaines galeries avec du fil de fer barbelé, laissant au fond, de grandes quantités d'explosifs en vrac, dans des caisses en bois et des emballages faits de papier paraffiné, des grenades et munitions.

[2055] © Association des Amis de Vauquois et sa Région.http://20000lieuessurlenet.over-blog.com/2016/05/la-butte-de-vauquois-4-ans-et-2-jours-de-combat.html

Les recherches historiques et archéologiques menées en Argonne dans le cadre de ce doctorat et par Guillaume Jacquinet (anciennement appartenant à l'Association des Amis de Vauquois), missionné par la DRAC Lorraine, fournissent un exemple et un aperçu saisissants, éclairants, des quantités et des typologies de matériels explosifs abandonnés et en partie encore présents de nos jours sous terre. Des reconnaissances de ces souterrains, faisant appel à des techniques de progression spéléologiques, ont été réalisées les 19 juin 2019, 24 juillet 2019, 4 février 2020 et 15 octobre 2021. Elles furent aussi l'occasion d'échantillonner des fragments de poudres, d'explosifs et les eaux souterraines ennoyant les systèmes profonds, pour des analyses au laboratoire (cf. Figure 391 et Figure 392).

Approche archivistique

Rares sont les documents décrivant, autour de l'armistice de novembre 1918, l'état des systèmes de galeries et souterrains abandonnés par les troupes du Génie allemand. Le rapport manuscrit du 21e Régiment du Génie, Section des projecteurs 115, du 10 novembre 1918[2056] concernant le matériel abandonné par les Allemands dans les souterrains de la butte de Vauquois fait état «*Explosifs : il existe un important dépôt dans le fond de la galerie Peter- (mine de gauche), environ 150 caisses de 75 à 80 kg. Plusieurs dépôts moins importants d'explosifs et de grenades dans les autres galeries* ». Le dépôt d'explosif de *Peterstollen* (Vauquois est) (totalisant environ 12 tonnes d'explosifs) n'aurait pas été retiré.

Approche archéologique et reconnaissances spéléologiques

Des recherches archéologiques menées en Argonne (secteurs de la Haute-Chevauchée, de la Fille Morte, etc.), à Vauquois, ont permis de relever l'existence de dépôts d'explosifs sous terre. A la Corniche (secteur Argonne ouest), deux abris français situés à quelques mètres sous terre renfermaient plusieurs centaines de sacs de toile de jute paraffinés contenant de la C*heddite*[2057] (cf. Figure 391). Le tonnage du dépôt n'est pas connu. Une quantité de plusieurs centaines de kilos semble vraisemblable. Une reconnaissance des souterrains allemands du système A3 à la Haute-Chevauchée a été effectuée en octobre 2021. Vers – 30 m / surface, à la croisée de deux galeries, un dépôt d'explosif allemand, enterré, a été découvert. Ce dépôt était connu du service du déminage, car en effet une partie de ce dernier a été brûlé in-situ comme en attestent les parois noircies des galeries visitées. Le dépôt a été dégagé ce jour-là. Lors de cette visite ont été dégagés environ 50 sacs de toile de jute, renfermant chacun 25 pains de *Perdite* de 1 kg, sacs parfois noués par paires et posés sur un plancher en bois qui semblait s'étendre sur l'ensemble de la chambre qui avait aussi été aménagée par des cadres et étais en bois encore visibles. Ces pains, bien que tassés par le poids de la terre qui les recouvrait et par l'effet d'une possible dissolution partielle, étaient, comme les sacs de toile, remarquablement bien conservés. Les emballages des pains d'explosif étaient intacts, sur lesquels étaient précisés, la nature de l'explosif (*Perdit*), le poids (1 kg) ainsi que l'usine de fabrication (*Cahülciwerke Nürnberg*). Un ensemble de cinq câbles en cuivre gainé débouchaient à proximité immédiate du dépôt. Il s'agissait de câbles de mise à feu électrique. Ce dépôt de 50 x 25 = 1 250 kg était un résiduel d'un dépôt plus vaste en partie brûlé in-situ par le Service du Déminage. L'objectif militaire de ce dépôt reste incertain. Il s'agit soit d'un dépôt intermédiaire desservant les rameaux de combats soit d'une charge d'autodestruction placée là, comme ailleurs dans les sites de guerre des mines, en 1918, par les Allemands et leur tactique de la Terre Brûlée, pour interdire aux Alliés l'accès aux souterrains. Cette dernière hypothèse paraît probable, le dépôt ayant été découvert à la croisée, entre plusieurs galeries de combat, et disposait d'un dispositif de mise à feu. Un échantillon d'eau de la nappe a été prélevé dans un rameau.

[2056] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 895. 21e Régiment du Génie. Section de Projecteurs 113. 10 novembre 1918.

[2057] $NaClO_3$ + paraffine, comme l'explosif français « S » (Corbin, 1915), *op cit.*

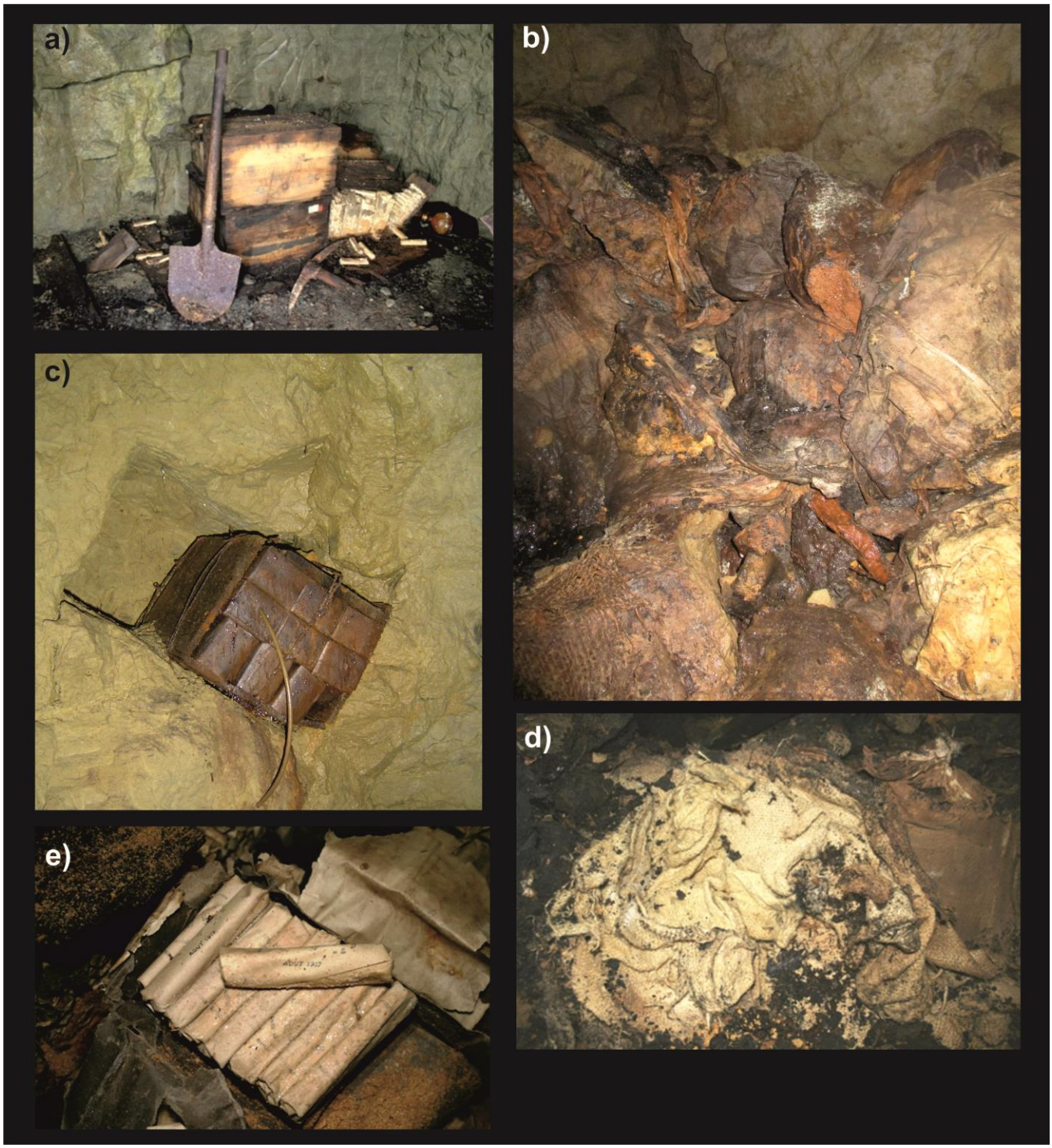


Figure 391. a) Pic, pelle et caisses d'explosif (dynamite-gomme) abandonnés sous terre en Argonne (mine française Z). A droite, au sol, une sphère d'extinction (Photo : Guillaume Jacquinet), b), d) dépôt d'explosif souterrain français dans un abri à La Corniche, Argonne ouest. L'explosif est à base de chlorate conditionné dans des sacs en toile de jute empilés en vrac dans le dépôt (Cheddite ou « Explosif S » ($NaClO_3$ + Paraffine) (Photo : Daniel Hubé (b)). Guillaume Jacquinet (d))), c) charge d'autodestruction en place prête à fonctionner à l'entrée de la galerie française S, donnant sur le flanc sud de la butte de Vauquois (Photo : Guillaume Jacquinet), e) Dynamite-gomme française (Photo : Guillaume Jacquinet). Les bâtons de dynamite portent la date de leur sortie d'usine (août 1917).

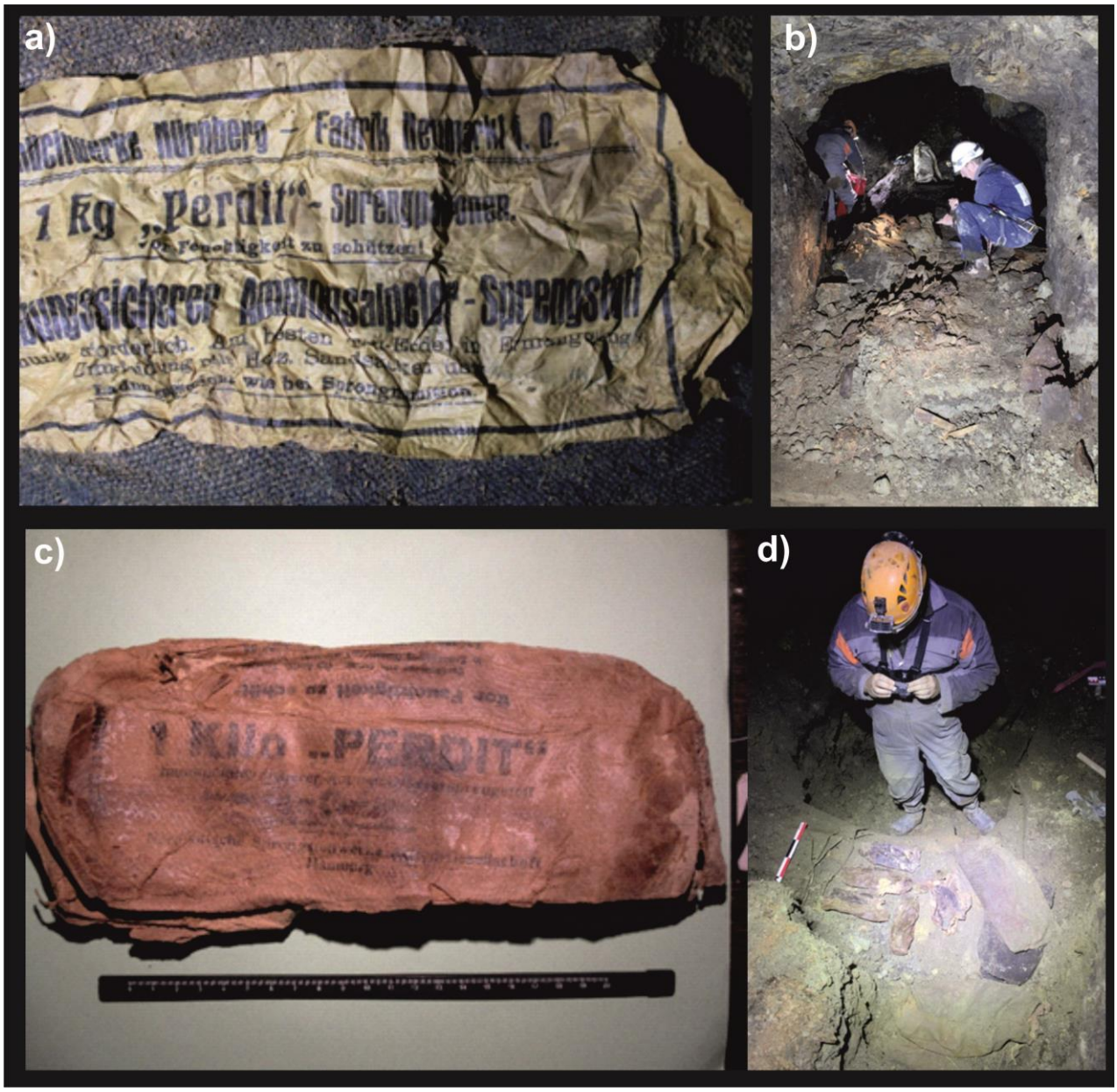


Figure 392 : Découverte de la charge allemande de Perdite dans le système allemand A3 à la Haute-Chevauchée (Argonne, octobre 2021). a) Papier d'emballage d'un pain d'explosif Perdite de 1 kg issu de l'usine Cahücitwerke Nürnberg – Fabrik Neumarkt i.o., b) lieu de la découverte du fourneau de Perdite, c) pain de 1 kg de Perdite issu de l'usine Norddeutsche Sprengstoffwerke Actien – Gesellschaft, Hamburg, d) fourneau de pain de Perdite constitué de sacs de toile de jute, renfermant chacun 25 kg d'explosifs, empilés sur un plancher en bois. Quatre câbles électriques en cuivre gainé actionnant le détonateur sont encore visibles sur la gauche.

Localement, des charges d'autodestruction « prêtes à l'emploi », encore dotées de leur cordon de mise à feu, ont aussi été localisées in-situ à proximité des entrées de galeries à la faveur de reconnaissances archéologiques comme à Vauquois (cf. Figure 391c). Nombreuses sont les munitions d'artillerie d'infanterie (cf. Figure 393) et d'armes portatives découvertes sous terre dans les galeries de combat en Argonne.L'acidité de la Gaize favorise la corrosion et le délitement rapide des parois en acier les plus fines, comme celles des grenades à manche allemandes (cf. Figure 394).

Figure 393 : Dépôts de bombes de tranchées à ailettes françaises type T58 DLS dans une soute d'une galerie du système de mine française «Z » à la Haute-Chevauchée (Photo : Guillaume Jacquinet).

Figure 394 : Grenades à manche et grenades sphériques allemandes partiellement corrodées abandonnées sous terre. Butte de Vauquois (Photo : Guillaume Jacquinet).

Ces reconnaissances et observations se réduisent à la Lorraine, à l'Argonne. D'autres secteurs du front occidental marqué par les combats de la guerre de mines sont vraisemblablement aussi concernés par des dépôts d'explosifs et/ou de munitions abandonnés sous terre.

3.2.5 Sites de destructions de munitions ?

A noter qu'un vaste entonnoir (de près de 30 m de diamètre pour 5 m de profondeur environ) a été découvert dans le fond du ravin de la Grande Courte-Chausse, dans une zone qui n'a pas été le siège de combat de guerre de mines (cf. Figure 395). L'observation des sols des abords immédiats de cet entonnoir montre la présence à l'affleurement de nombreux éclats, fragments métalliques, mais aussi grenades, projectiles Aasen, etc. Ces objets et éléments sont caractéristiques de l'auréole de projection d'entonnoirs de destruction par *Open Detonation (OD)*. Il est aussi vraisemblable, au regard des instructions du GQG en matière de choix des sites de destruction par OD (dans les cratères préexistants du fait des faits de guerre), que les entonnoirs de guerre de mines aient servi *post-bellum* à des opérations de destruction de munitions.

Fontaine allemande des Courtes Chausses

Grenade à main et éclats métalliques

Entonnoir d'éclatement, vue générale

Grenade à main

Figure 395 : Observations à proximité de site de destruction de munitions supposé des Courtes-Chausses. Aperçu photographique.

3.2.6 Caractérisation hydrochimique des eaux, secteur Argonne

Echantillonnage et analyses réalisés

L'échantillonnage des eaux du secteur de l'Argonne s'est effectué en cinq campagnes successives (le 14/06/2017, le 20/07/2018, les 12/02/2019 et 13/02/2019, du 10/06/2019 au 13/06/2019 et le 15/10/2021. Un total de 70 échantillons a été collecté (eaux brutes pour l'analyse des composés organiques par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES, eaux filtrées à 0,45 µm pour l'analyse des composés inorganiques par le laboratoire du BRGM). Les échantillons ont été tous systématiquement analysés pour la recherche des ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-) et, pour 58 d'entre eux, pour les nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+). La liste analytique a été allongée aux cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) et anions (Cl^-, F^- HCO_3^-, SO_4^{2-}) majeurs pour 43 échantillons. 13 échantillons (dont six échantillons d'eau ennoyant les systèmes de galeries profonds) ont été constitués pour l'analyse par le LHN des NAC selon des protocoles analytiques décrits dans ce qui précède.

Les systèmes de galeries allemandes A, G et *Teddy* (Haute-Chevauchée, Fille Morte), *Erda* (Corniche) ont été visités le 11/06/2019 et les eaux souterraines ennoyant leurs extrémités ont été échantillonnées pour l'analyse différée au laboratoire. L'opération fut réitérée le 15/10/2021 avec le système de galeries français F28 et allemand A3 à la Haute-Chevauchée (soit un total de <u>six échantillons d'eau de galeries</u>).

On rappelle que les eaux de la source FP5 du Four-de-Paris ont été aussi échantillonnés (en juillet 2019) pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du chlore dans ClO_4^-. Les eaux ennoyant les parties basses des galerie G, *Teddy* et A3, ainsi que les eaux de la source FP5 ont été spécialement échantillonnées (en 2019 et 2021) analysées pour le dosage (par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble) des abondances $\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$, $D^{17}O$ et $\delta^{15}N$ des nitrates (NO_3^-) selon un protocole analytique décrit dans ce qui précède.

Le secteur échantillonné (secteur Argonne) couvre environ 7 x 9 km (NS x EW). Il est présenté sur la carte de la Figure 399. Des sous-secteurs ont été individualisés, notamment afin de faciliter la lecture des résultats et du fait de leur situation géographique et/ou de la densité des points d'échantillonnage. On distingue (i) le sous-secteur du Four-de-Paris, (ii) le sous-secteur de La Harazée et (iii) le sous-secteur de Servon.

L'ensemble des résultats est consigné sous forme de tableaux en Annexe I du présent manuscrit. Les résultats et la distribution spatiale des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium font l'objet de la Figure 400 (Argonne), de la Figure 401 (Four-de-Paris), de la Figure 402 (La Harazée) et de la Figure 403 (Sevron).

Faciès hydrochimique

Les eaux des sources et galeries apparaissent faiblement minéralisées (avec une conductivité électrique comprise entre 100 et 300 $\mu S.cm^{-1}$), bien oxygénées (> 90% de saturation), avec un pH proche de la neutralité ou légèrement acide. L'oxygénation des eaux atteste d'une bonne connexion entre les eaux météoriques infiltrées et la nappe libre de la Gaize dans laquelle les eaux circulent et d'une faible teneur de la Gaize en matière organique oxydable. Les pH les plus acides ont été mesurés dans les eaux des galeries profondes ennoyées de la Fille Morte et de la Haute-Chevauchée (pH entre 5,5 et 5,8). Il est vraisemblable que cette acidité soit ensuite tamponnée par la circulation des eaux dans le massif de la Gaize et au contact de faciès carbonatés. Les résultats des analyses des anions (Cl^-, NO_3^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}) et cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) (cf. Figure 398) n'ont pas mis en évidence d'anomalies hydrogéochimiques particulières. Ces eaux présentent un faciès plutôt carbonaté calcique.

Occurrences d'ions chlorate et perchlorate

Les campagnes d'échantillonnage et d'analyses réalisées entre 2017 et 2021 montrent l'occurrence (i) dans les eaux des sources (alimentant les ruisseaux en fond de ravin, affluents de la Biesme), et (ii) dans les eaux des galeries, d'ions perchlorate à des concentrations variables selon les secteurs et en fonction du temps (pour les points ayant été échantillonnés à plusieurs reprises). On dénombre 47 quantifications sur 70 échantillons analysés, soit une fréquence de quantification de 67%, alors que les ions chlorate n'ont été quantifiés que dans 23 échantillons, soit une fréquence de quantification de 31%, en grande partie liée aux limites de quantification du laboratoire oscillant entre 0,5 et 50 $\mu gClO_3^-.L^{-1}$, soit un facteur 1 à 100 fois plus élevées que celles des ions perchlorate s'établissant à 0,5 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$. Ces limites de quantification élevées et évolutives pour les ions chlorate rendent les données de concentrations relatives à ces ions difficilement exploitables et interprétables avec fiabilité. On constate aussi pour ces ions de très grandes variabilités dans les concentrations mesurées (de 0,5 $\mu gClO_3^-.L^{-1}$à 93 700 $\mu gClO_3^-.L^{-1}$). Ainsi, ce secteur d'étude s'individualise de ceux du massif des Vosges par le caractère étendu du marquage perchloraté des eaux. Les concentrations s'échelonnent de 0,6 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ à 123 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ (au Four-de-Paris). Le graphique de la Figure 396 montre la distribution de la population des concentrations mesurées. On constate que près de 49% des valeurs mesurées n'excèdent pas la valeur guide de gestion de 4 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ recommandée par la Direction générale de la santé (DGS) pour les nourrissons (de moins de 6 mois) et 75% des concentrations ne dépassent pas la valeur guide de gestion de 15 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ préconisée pour la population générale. Une population très nettement anomalique se différencie à partir de 40 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ (gamme [40-123 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$].

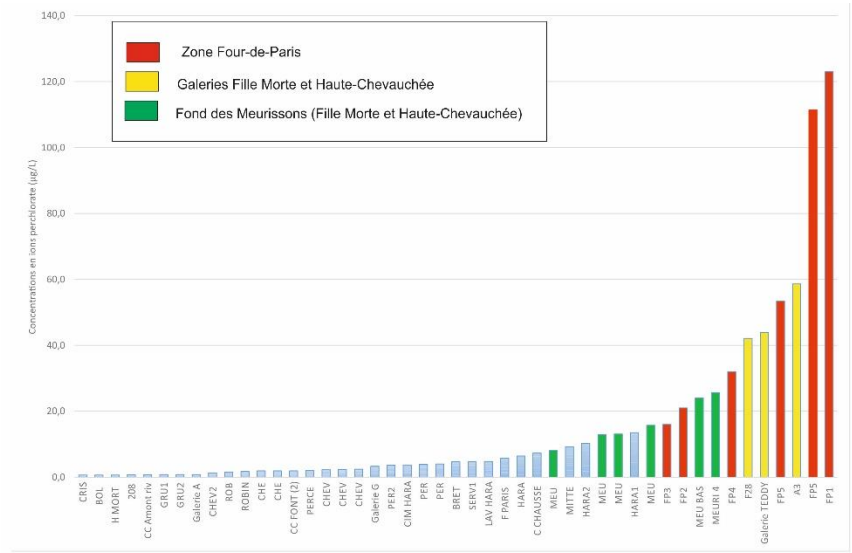
Au regard de ces données, deux zones géographiques fortement marquées par les ions perchlorate se différencient.

La première correspond à la croupe topographique d'orientation nord-est / sud-ouest, délimitée au nord par le Ravin des Meurissons et au sud par celui des Courtes Chausses, bordées par des sources en fond de ravins. Ces sources apparaissent très nettement marquées à la fois par les ions perchlorate et les ions chlorate, ce qui distingue cette zone des autres zones perchloratées marquées uniquement par les ions perchlorate. Les concentrations en ClO_4^- (ion perchlorate) y oscillent entre 2 et 150 µgClO_4^-.L^{-1} et pour ClO_3^- (ion chlorate) 10 et 53 µgClO_3^-.L^{-1} avec des maxima se concentrant à l'ouest, vers le secteur des Courtes Chausses et du Four-de-Paris, c'est-à-dire vers les secteurs topographiquement les plus bas. C'est sur cet axe que se rencontrent les concentrations les plus élevées et très nettement anomaliques.

Les concentrations en ions perchlorate relevées dans les eaux ennoyant les parties profondes des galeries du secteur de la Fille Morte et de la Haute-Chevauchée, situées dans cette zone, sont aussi très nettement marquées (jusqu'à 58 µgClO_4^-.L^{-1} dans la galerie allemande A3 et jusqu'à 93 700 µgClO_3^-.L^{-1} dans la galerie française F28).

La seconde zone est celle d'un second axe, parallèle au premier, s'étendant de La Harazée au sud-ouest au Bois de la Gruerie au nord-est. Les concentrations en ions perchlorate sont moindres que sur l'axe Four-de-Paris / Haute-Chevauchée, s'étendant dans une gamme de 0,5 à 13 µgClO_4^-.L^{-1}. Sur ce dernier secteur, les ions chlorate n'ont été détectés puis quantifiés qu'à l'état de traces en février 2019 avec 1,9 µgClO_3^-.L^{-1}.

Les relations entre concentrations en anions et cations majeurs et celles en ions perchlorate ont été recherchées. Aucune corrélation significative n'a pu être identifiée (celles notamment entre ClO_4^- et Cl^- et Na^+). Lorsque les données des concentrations en ions perchlorate sont croisées avec celles des ions nitrate une tendance générale semble se dessiner d'une relation entre les deux ions (cf. Figure 397), les deux concentrations augmentant conjointement. Ces nitrates ne sont pas d'origine agricole compte tenu de l'usage actuel et ancien des sols d'Argonne. Seule une origine pyrotechnique ancienne et historique peut être supputée.



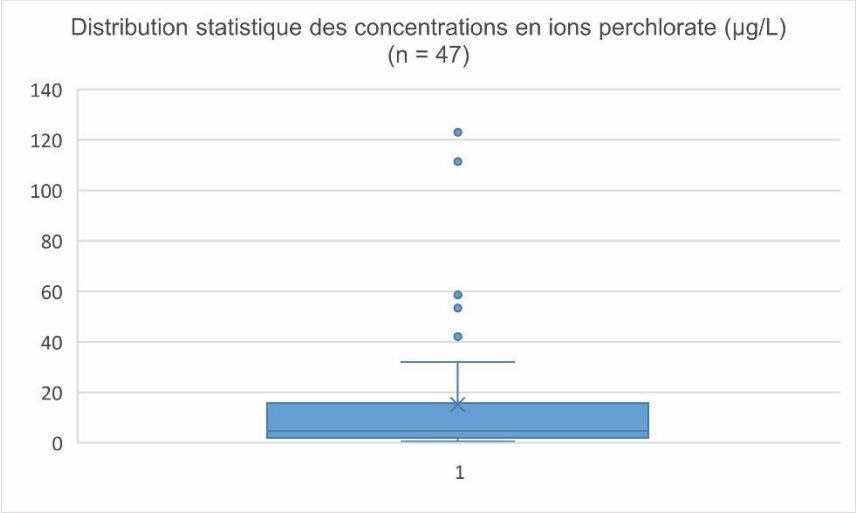


Figure 396 : Distribution des populations de concentration en ions perchlorate, secteur Argonne (n = 47).

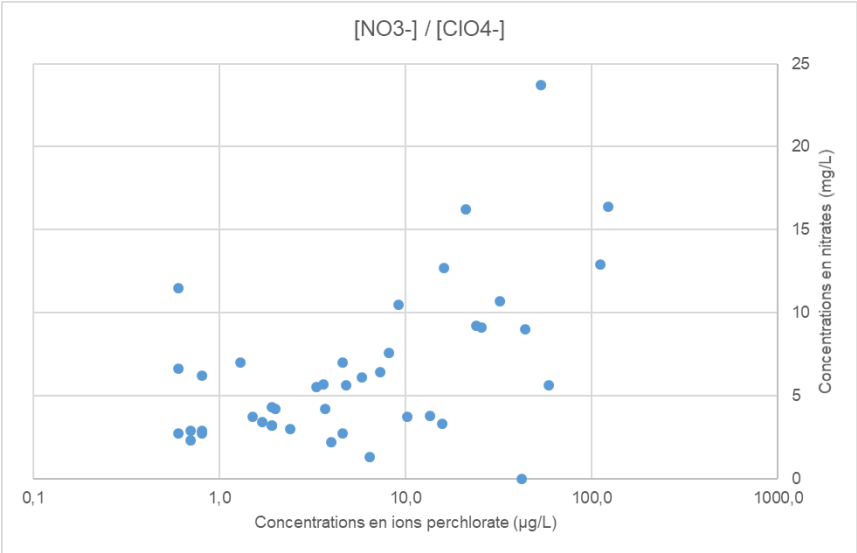


Figure 397 : Concentrations en ions nitrates versus concentrations en ions perchlorate en Argonne (n = 42).

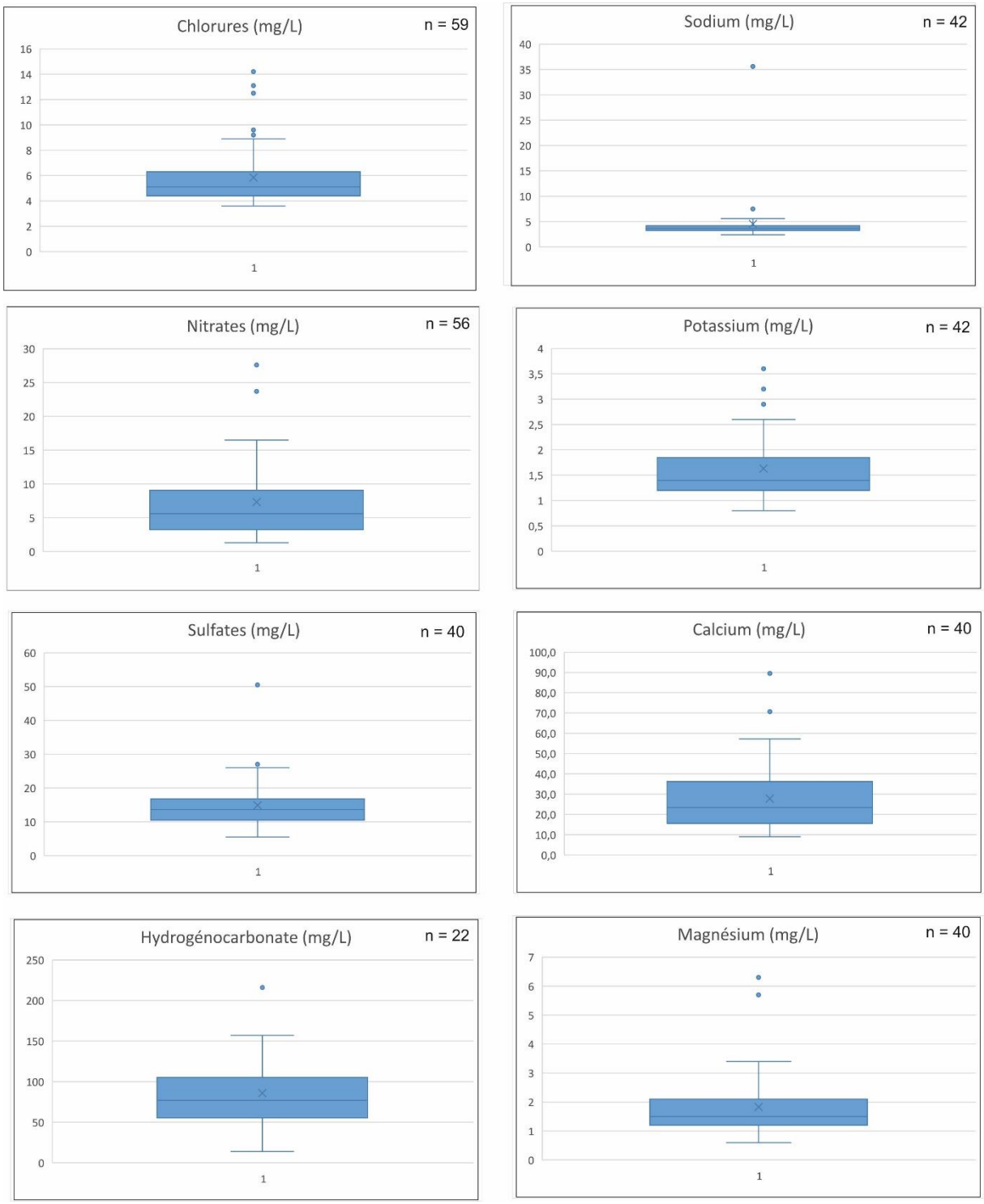


Figure 398 : Distribution des concentrations en anions et cations majeurs dans les eaux des sources et galeries de l'Argonne.

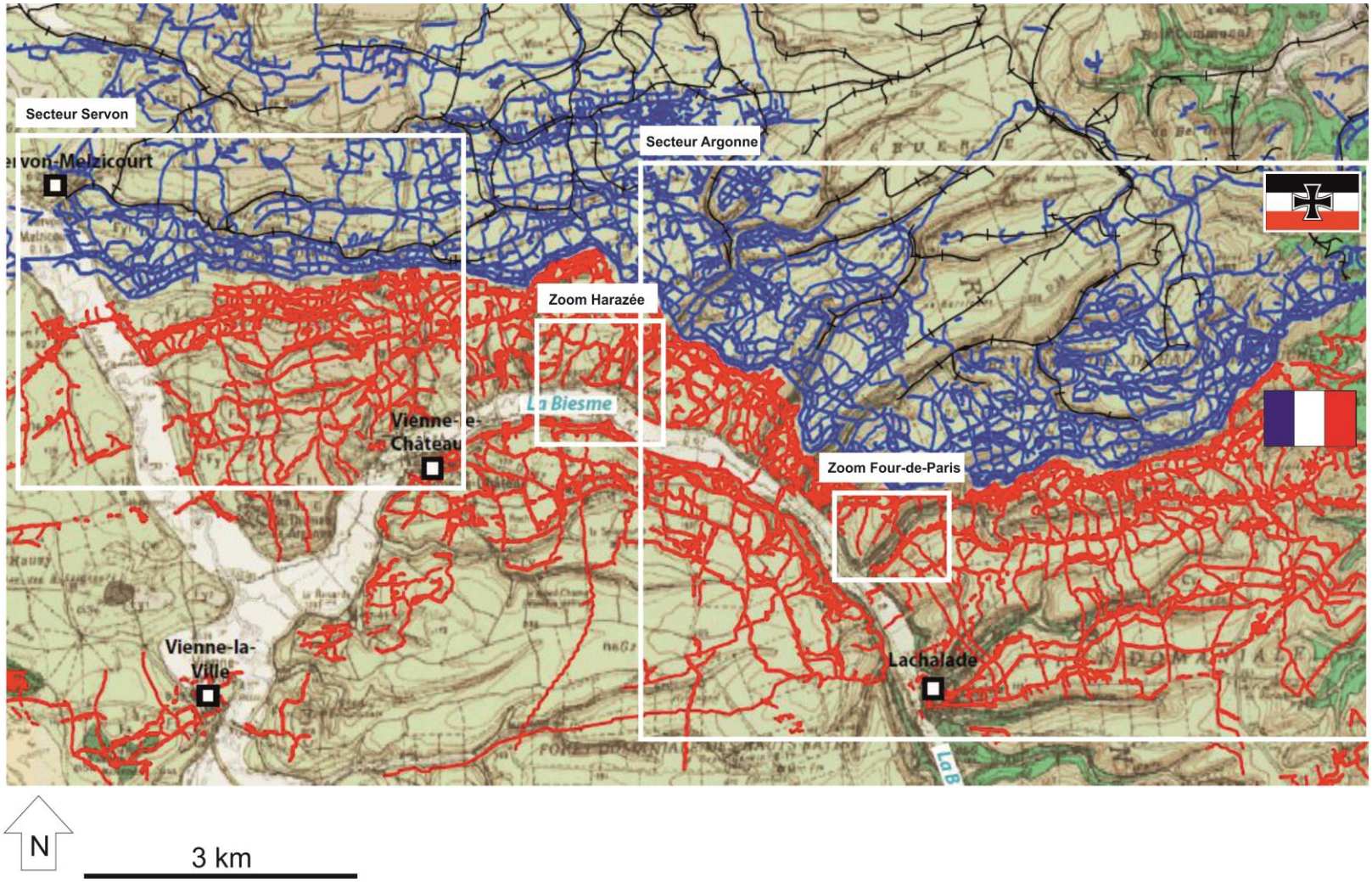


Figure 399 : Organisation des réseaux de tranchées allemandes (au nord en bleu) et françaises (au sud en rouge)[2058] et localisation des secteurs d'étude en Argonne. D'après les Plans Directeurs des Groupes de canevas de tir pour la période 1916–1918.

[2058] Fond de carte tiré de Jérôme Brenot, J., Nicolas Saulière, N., Léty, C., Taborelli, P., Zélie, B., Blondeau, R., Devos, D., Desfossés, Y. (2016). *How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. Geoarchaeology.* 2017;1–15. DOI: 10.1002/gea.21623.

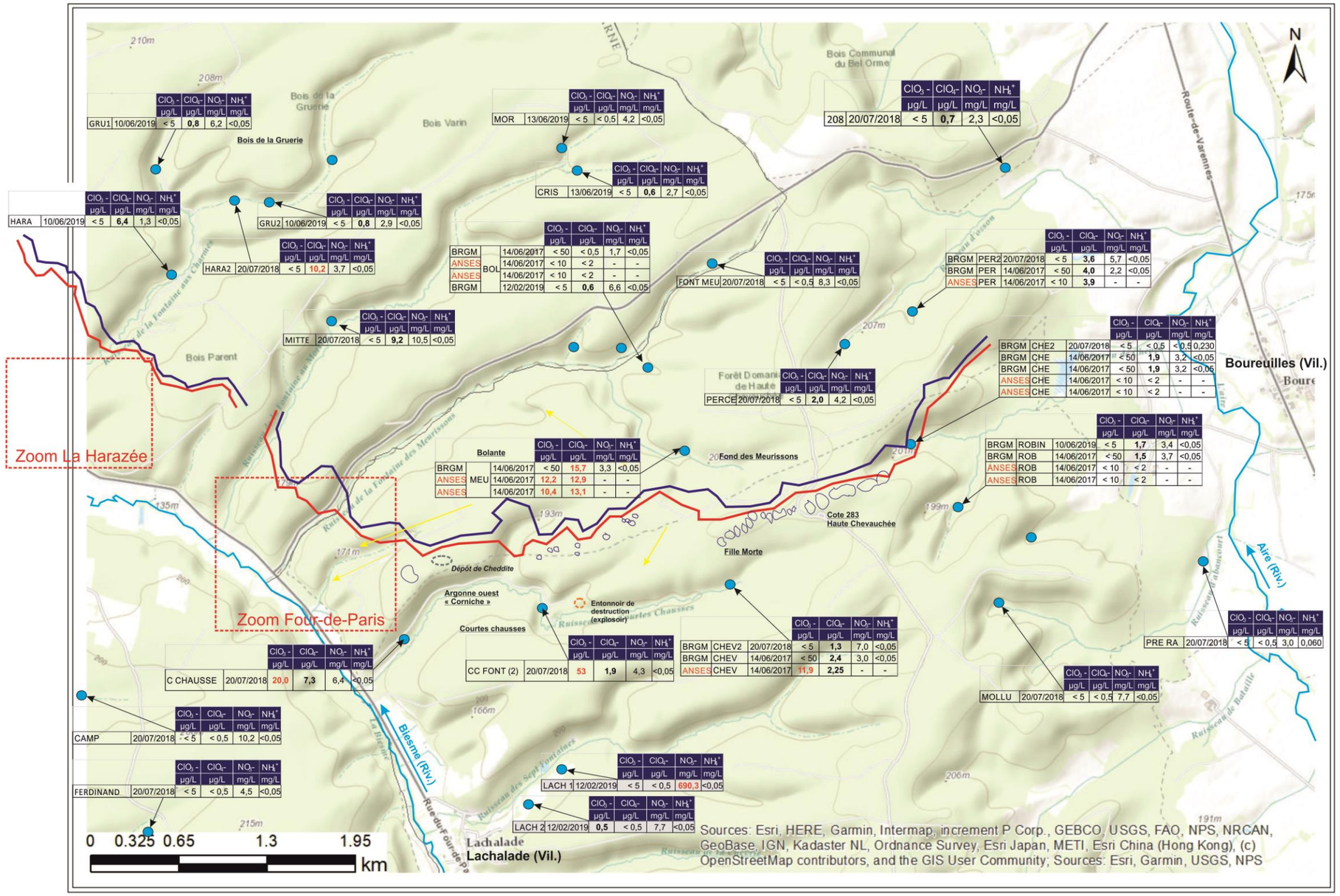


Figure 400 : Secteur Argonne. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2017 – 2021).

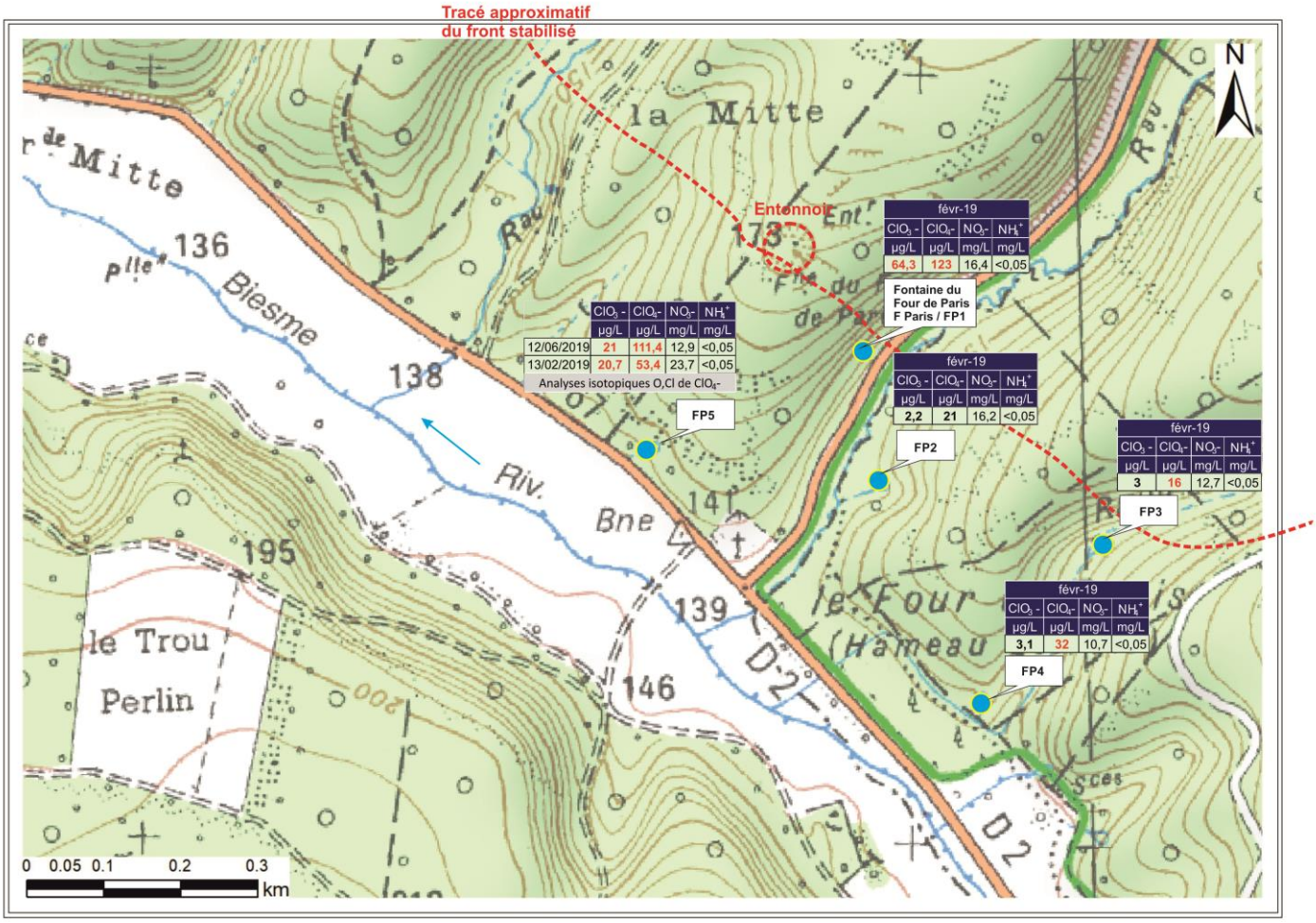


Figure 401 : Secteur Argonne, sous-secteur Four-de-Paris. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2017-2021).

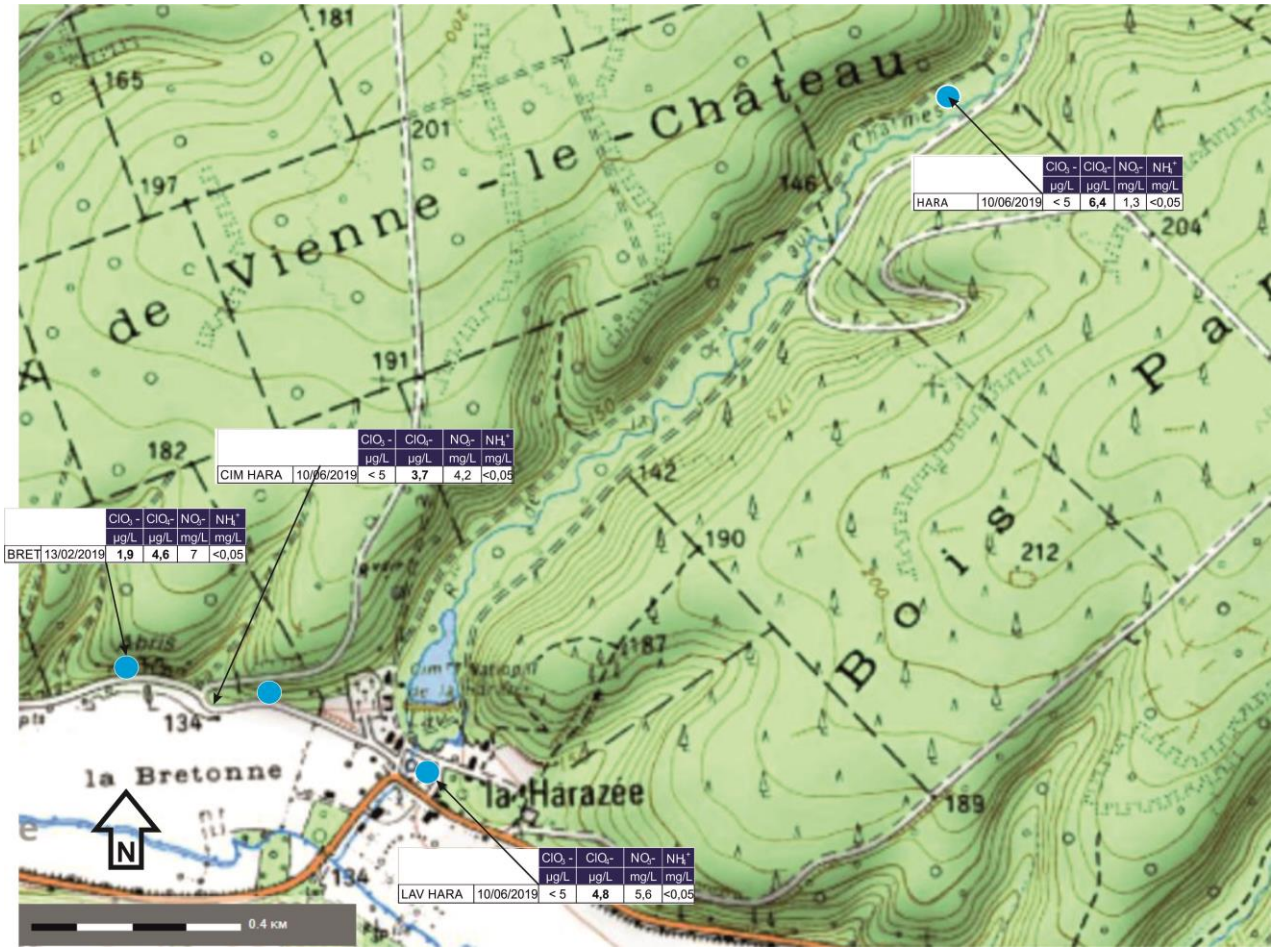


Figure 402 : Secteur Argonne, sous-secteur La Harazée. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2019).

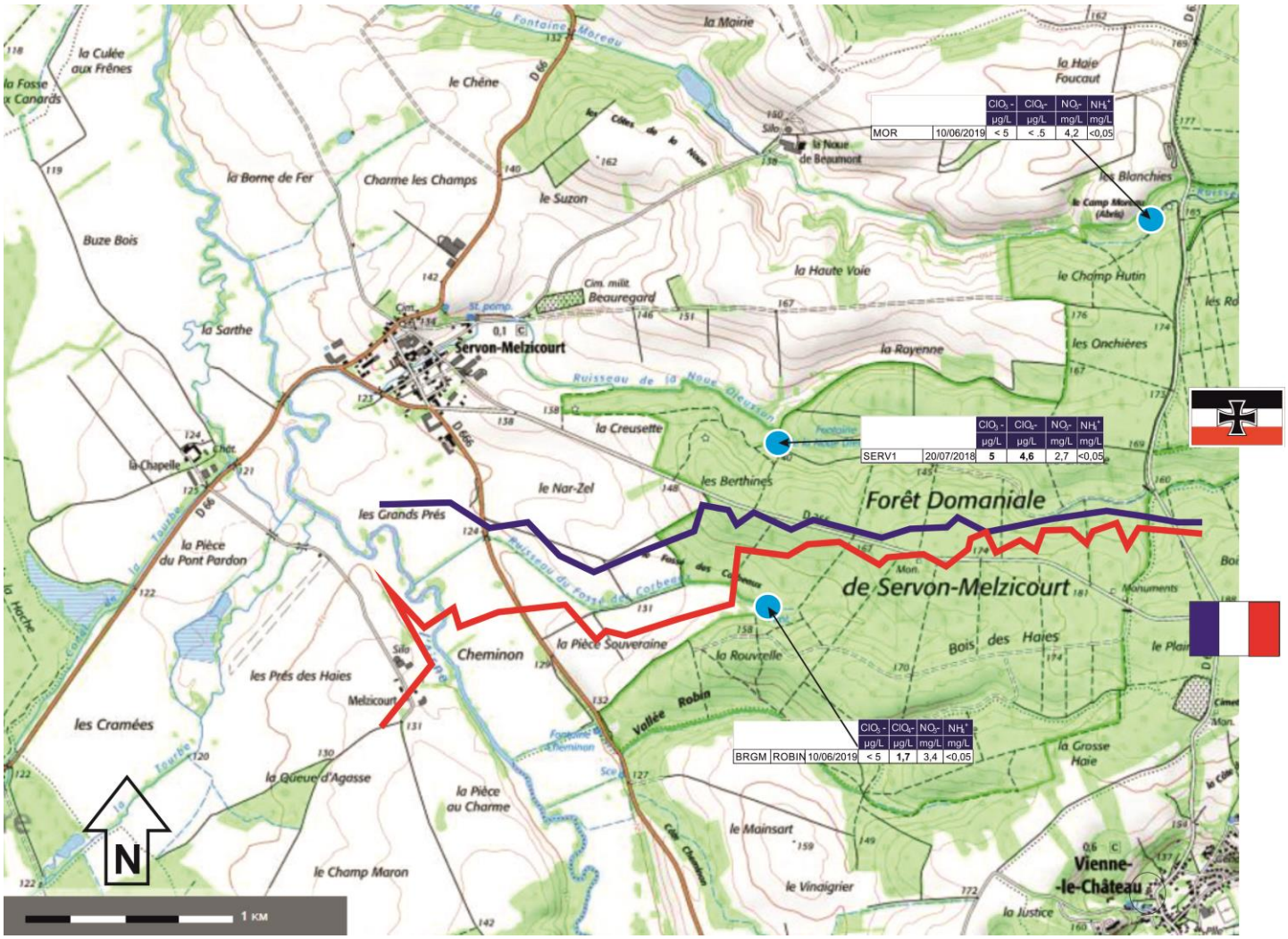


Figure 403 : Secteur Argonne, sous-secteur Servon. Résultats analytiques pour les ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+) (2018 – 2019).

3.2.7 Occurrences de composés nitroaromatiques

Aucun composé n'a été quantifié dans les 17 échantillons d'eau prélevés en juillet 2018 en Argonne. Les limites de quantification appliquées par le laboratoire spécialisé Envilytix GmbH étaient celles adaptées aux pollutions industrielles concentrées de sites de destruction de munitions et/ou de sites de production d'explosifs et semblent inadaptées à la caractérisation de l'empreinte environnementale de ces composés à l'échelle des aquifères. Cette limite était de 100 $ng.L^{-1}$ (0,1 $\mu g.L^{-1}$).

L'échantillonnage s'est poursuivi en juillet 2019, octobre 2021. L'ANSES (LHN, Laboratoire d'Hydrologie de Nancy) était alors dotée de moyens analytiques permettant de doser plus de 50 composés caractéristiques des explosifs de la Grande Guerre, et leurs sous-produits de transformation environnementale à des limites de quantification de quelques $ng.L^{-1}$ à quelques centaines de $ng.L^{-1}$ selon les matrices analysées, les composés et les concentrations en présence. Ces analyses se firent par « tâtonnement » sur des composés qui n'avaient encore jamais été recherchés en France dans les eaux. Les NAC apparaissent très nettement dans les eaux souterraines ennoyant les parties profondes des systèmes de galeries, à la Haute-Chevauchée (*Teddy, Erda*, F28 et A3) avec des concentrations maximales de ∑NAC = 677 $ng.L^{-1}$ (galerie allemande A3) (cf. Figure 404)

Les composés prépondérants sont les isomères du DNT (et en particulier le 2,6-DNT, et en moindre mesures les 2,3-DNT et 2,4-DNT) (cf. Figure 405) Les eaux de la galerie Allemande A3 sont majoritairement marquées (à plus de 75% de ∑NAC) par le 2,4,6-TNT et le 2,4-DNT, associés à des traces d'autres isomères du DNT et de composés mononitrés (isomères du nitrotoluène). On rappelle ici que c'est dans ce système qu'une charge non explosée formée de *Perdite* a été découverte à la faveur d'une reconnaissance souterraine en octobre 2021. L'association TNT + DNT est assez caractéristique de cette formulation d'explosifs.

Les eaux de la galerie *Teddy* montrent la présence à hauteur de 15 $ng.L^{-1}$ d'isomères d'ADNT, qui témoigne de processus de biodégradation réductive du TNT. Les eaux de la galerie française F28 (Haute-Chevauchée) ne montrent pas une signature chimique d'explosifs français mais plutôt allemand du fait de la prépondérance dans le cortège de composés quantifiés du 1,3-DNB (composé majoritaire avec 91 $ng.L^{-1}$) et des isomères du DNT (ces deux composés n'entrant pas dans les formulations des explosifs nitrés français durant la Grande Guerre).

Les analyses réalisées par le LHN sur les eaux échantillonnées en juillet 2021 en Argonne n'ont pas mis en évidence un marquage des sources en NAC, à l'instar des eaux issues des systèmes de galeries profondes. Les eaux les plus fortement perchloratées au Four-de-Paris ne se sont pas révélées impactées par les NAC.

Les eaux de la fontaine allemande des Courtes-Chausses (échantillon CC Font) présentent la particularité d'être nettement marquées par les NAC alors que d'autres sources, bien plus proches de l'ancienne ligne de front et de la zone de guerre de mines apparaissent dépourvues en ces composés. Cette source est marquée par les 2,3- et 2,6-DNT à hauteur respectivement de 49,4 et 30 $ng.L^{-1}$. Elle se localise à proximité d'une vaste dépression qui présente toutes les caractéristiques d'un entonnoir de pétardement de munitions (« explosoir »).

On constate donc en Argonne l'existence d'un marquage des eaux au sein des systèmes de galeries ennoyées par des cortèges de NAC montrant des signatures différentes mais toujours proches de celles des explosifs allemands, avec la prédominance des DNT, TNT et DNB, associés à une grande diversité d'autres composés qui apparaissent à l'analyse lorsque les concentrations en composés di- et tri-nitrés sont élevées : mononitrotoluène (impureté, intermédiaire de production des DNT) et dinitronaphtalènes. Ces eaux sont aussi très nettement chloratées et perchloratées. Ce marquage des eaux n'apparaît pas dans les sources (exutoires du système anthropisé de la nappe de la Gaize) du secteur d'étude au regard de l'échantillonnage réalisé, à l'exception d'une source dans le Ravin des Courtes-Chausses dont l'origine n'est peut-être pas à rechercher dans la guerre de mines et les combats en Argonne mais dans des opérations de destruction de REG de l'immédiate sortie de guerre.

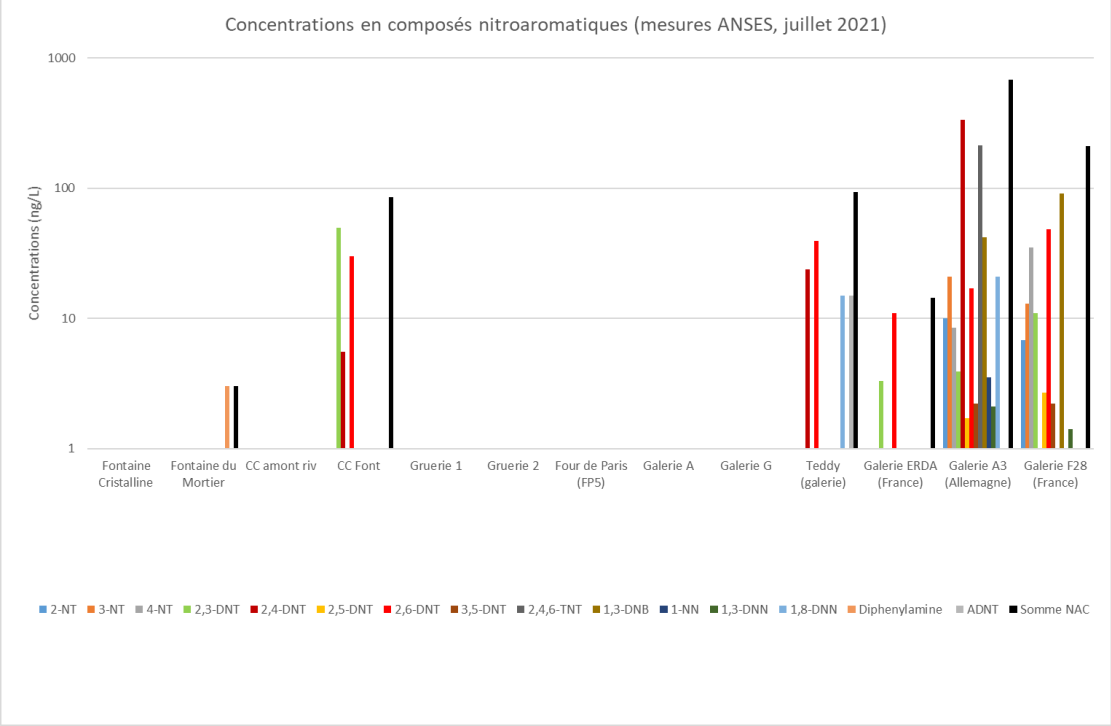


Figure 404 : Concentrations en composés nitroaromatiques quantifiés dans les eaux en Argonne (avec au moins un positif) (juillet 2021).

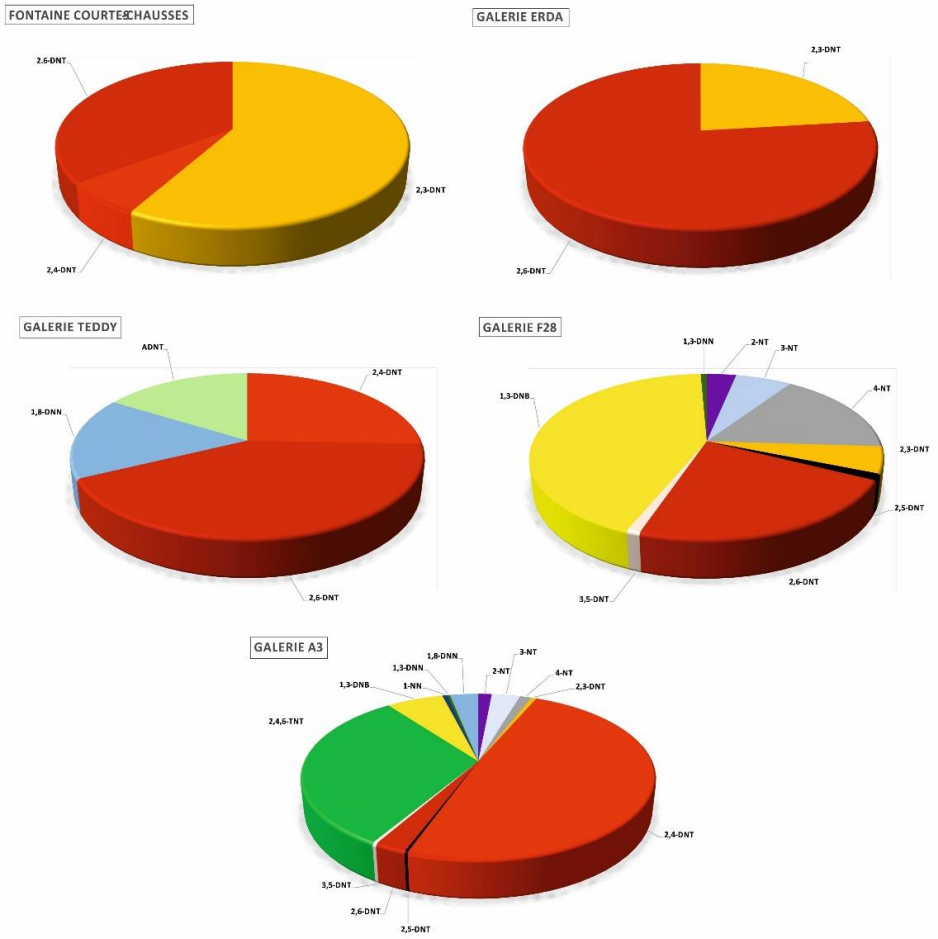


Figure 405 : Signatures des composés nitroaromatiques quantifiés dans les eaux en Argonne (avec au moins un positif) (juillet 2021).

3.2.8 Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines, secteur Vauquois

Echantillonnage et analyses réalisés

L'échantillonnage des eaux du secteur de Vauquois s'est effectué en quatre campagnes successives du 11/02/2019 au 13/02/2019, le 01/07/2019, le 04/02/2020 et les 22/06/2023 et 23/06/2023. Un total de 19 échantillons a été collecté (eaux brutes pour l'analyse des composés organiques par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES, eaux filtrées à 0,45 µm pour l'analyse des composés inorganiques par le laboratoire du BRGM). Les échantillons ont été tous systématiquement analysés pour la recherche des ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-) nitrate (NO_3^-), ammonium (NH_4^+). La liste analytique a été allongée par les cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) et anions (Cl^-, F^- HCO_3^-, SO_4^{2-}) majeurs pour quatre échantillons. Huit échantillons ont été constitués (dont deux échantillons d'eau de galerie) pour l'analyse par le LHN des NAC selon le protocole analytique décrit dans ce qui précède.

Les galeries françaises, S' et S' gauche (flanc sud) et allemandes *Kampfstollen* (Vauquois est) ont été visitées et leurs eaux échantillonnées le 04/02/2021, celles de *Oststollen* et *Raderstollen* (Vauquois est) le 01/07/2019.

Les eaux ennoyant les parties basses des galeries françaises S', S' gauche et de la galerie allemande *Raderstollen*, ainsi que les eaux de trois sources ont été spécialement échantillonnées (en 2019, 2020 et 2023) et analysées pour le dosage (par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble) des abondances $\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$, $D^{17}O$ et $\delta^{15}N$ des nitrates (NO_3^-) selon un protocole analytique décrit dans ce qui précède.

L'ensemble des résultats est rassemblé sous forme de tableaux en Annexe I (résultats analytiques) et en Annexe J (résultats isotopiques) du présent manuscrit. Les résultats et la distribution spatiale des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium sont présentés sur la Figure 408 (Argonne). Les résultats pour les NAC sont présentés sur la carte de la Figure 409.

Résultats

Les eaux des sources formant l'exutoire du petit bassin versant de la nappe de la Gaize constitué par la butte de Vauquois, ainsi que les eaux ennoyant les systèmes de galeries profondes allemandes (nettement plus profondes que celles installées par les Français) s'avèrent aussi marquées par les ions perchlorate et les NAC. Le marquage chloraté apparaît à Vauquois très net et bien plus prononcé et étendu qu'en Argonne, avec des concentrations s'avérant très élevées dans les sources de la Fontaine Notre Dame (142 000 µgClO_3^-.L^{-1}), dans la source nord-est (176 µgClO_3^-.L^{-1}) et la source du lavoir (372 µgClO_3^-.L^{-1}), alors que les concentrations en ions perchlorate n'excèdent pas 36 µgClO_4^-.L^{-1} (Fontaine Notre Dame, 2018). La présence d'ions perchlorate est systématiquement détectée dans les galeries échantillonnées, depuis des traces jusqu'à des concentrations de 158 µgClO_4^-.L^{-1} (*Raderstollen,* juillet 2019).

Dans les systèmes de galeries profondes de Vauquois est, les concentrations en NAC sont élevées (cf. Figure 407) (∑NAC = 6 107 ng.L^{-1} pour *Raderstollen* et ∑NAC = 4 873 ng.L^{-1} pour *Oststollen*). Les cortèges sont très majoritairement dominés par les isomères du (i) DNT (∑DNT = 2 089 ng.L^{-1} (soit 34,2% ∑NAC) pour *Raderstollen* ∑DNT = 1 429,1 ng.L^{-1}(soit 29,3% ∑NAC) pour *Oststollen* et du (ii) ∑DNB = 3 013 ng.L^{-1}(soit 49,3% ∑NAC) pour *Raderstollen* et ∑DNB = 2 565 ng.L^{-1}(soit 52,6% ∑NAC) pour *Oststollen* (cf. Figure 406) Il s'agit très majoritairement des 2,4-DNT et du 1,3-DNB. Ces composés sont accompagnés d'un cortège d'autres NAC mais en concentrations bien moindre, dont le TNT (avec environ 280 ng.L^{-1}) et des isomères des dinitronaphtalènes (à des concentrations n'excédant pas 100 ng.L^{-1}).

On dénote la présence de concentrations significatives en métabolites du TNT : amino-dinitrotoluènes (ADNT) et diamino-nitrotoluènes (DANT) à hauteur de ∑ADNT + DANT = 547 et 492 ng.L^{-1}pour respectivement *Raderstollen* et *Oststollen*, des concentrations qui représentent environ 10% ∑NAC, attestant par-là que des processus de biodégradation réductive conduisant au stade diamino ont lieu dans les eaux de la nappe de la Gaize et/ou dans la zone non saturée exposée à l'infiltration des eaux météoriques.

Les profils des concentrations en NAC des eaux des sources émanant du massif de la Gaize à Vauquois sont sensiblement différents de ceux identifiés pour les eaux ennoyant les galeries (cf. Figure 406). Les concentrations s'avèrent très élevées au niveau des eaux du lavoir (flanc sud de la butte) avec ∑NAC = 14 070,9 ng.L^{-1} (2023), et les cortèges sont très majoritairement dominés par les isomères du DNT (entre 68 et 97% de ∑NAC) et en particulier les 2,3-DNT et 2,6-DNT. Les isomères des mono- et di-nitronaphtalènes n'ont pas été quantifiés contrairement aux eaux des galeries qui sont exemptes d'isomères mono-nitrés, et contrairement aux sources où les isomères du nitrotoluène sont présents (max ∑NT = 574 ng.L^{-1}à la Fontaine Notre Dame (flanc nord) en juin 2023). Des traces de DNB ont aussi été quantifiées. Les ADNT sont mesurés à des concentrations maximales de 106 ng.L^{-1} (Fontaine Notre Dame en juin 2023), témoignant là aussi de processus de biotransformation réductive.

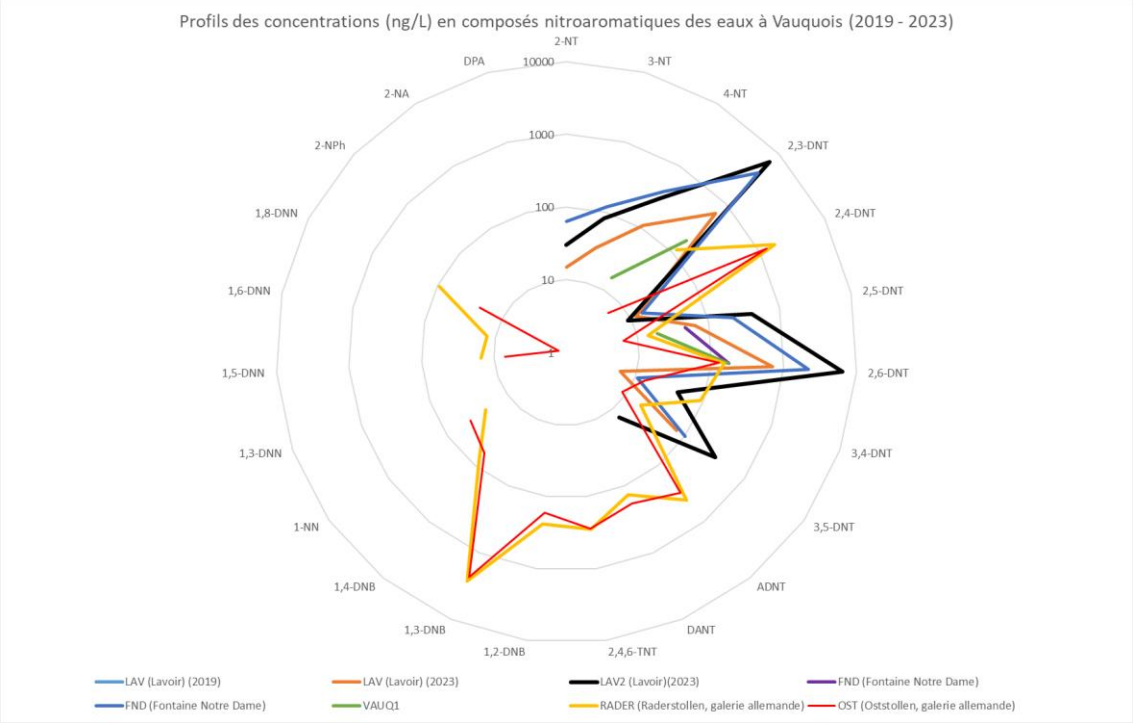


Figure 406 : Profil des concentrations en composés nitroaromatiques des eaux des sources et galeries à Vauquois (composés ayant au moins un positif) (2019-2023).

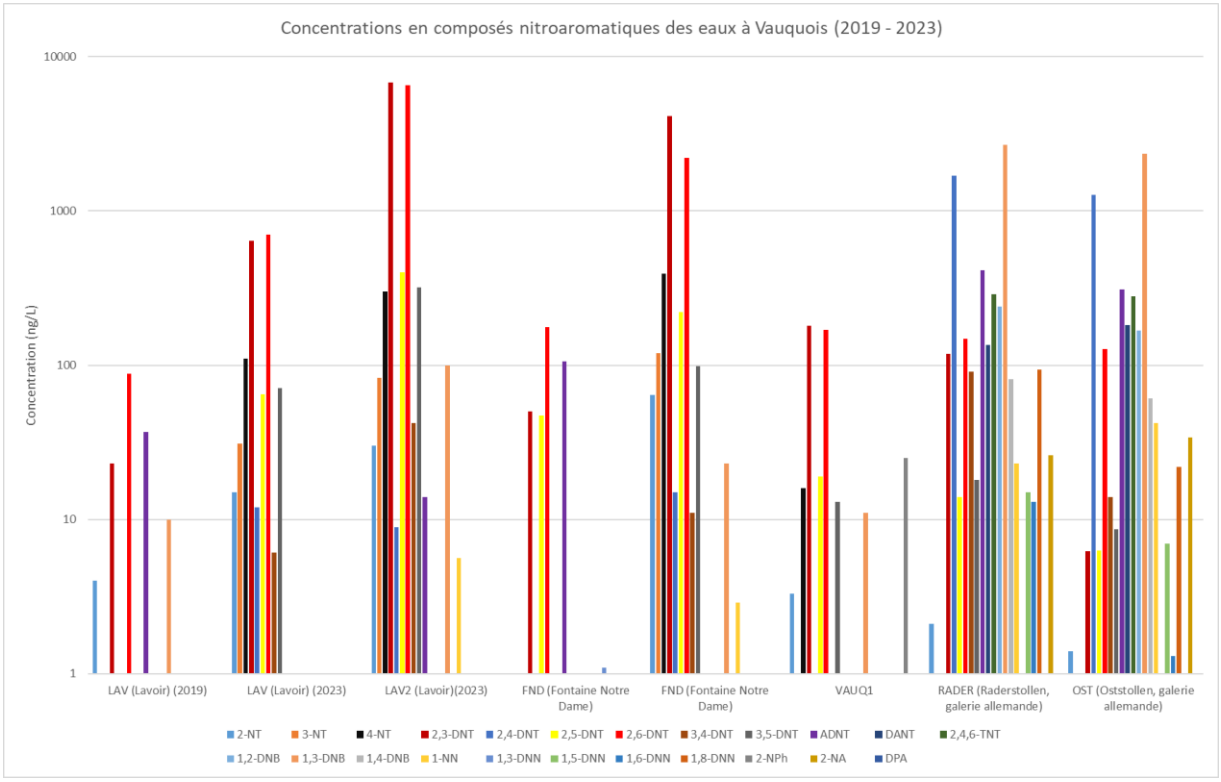


Figure 407 : Concentrations en composés nitroaromatiques mesurés dans les eaux des sources et galeries à Vauquois (composés ayant au moins un positif) (2019-2023).

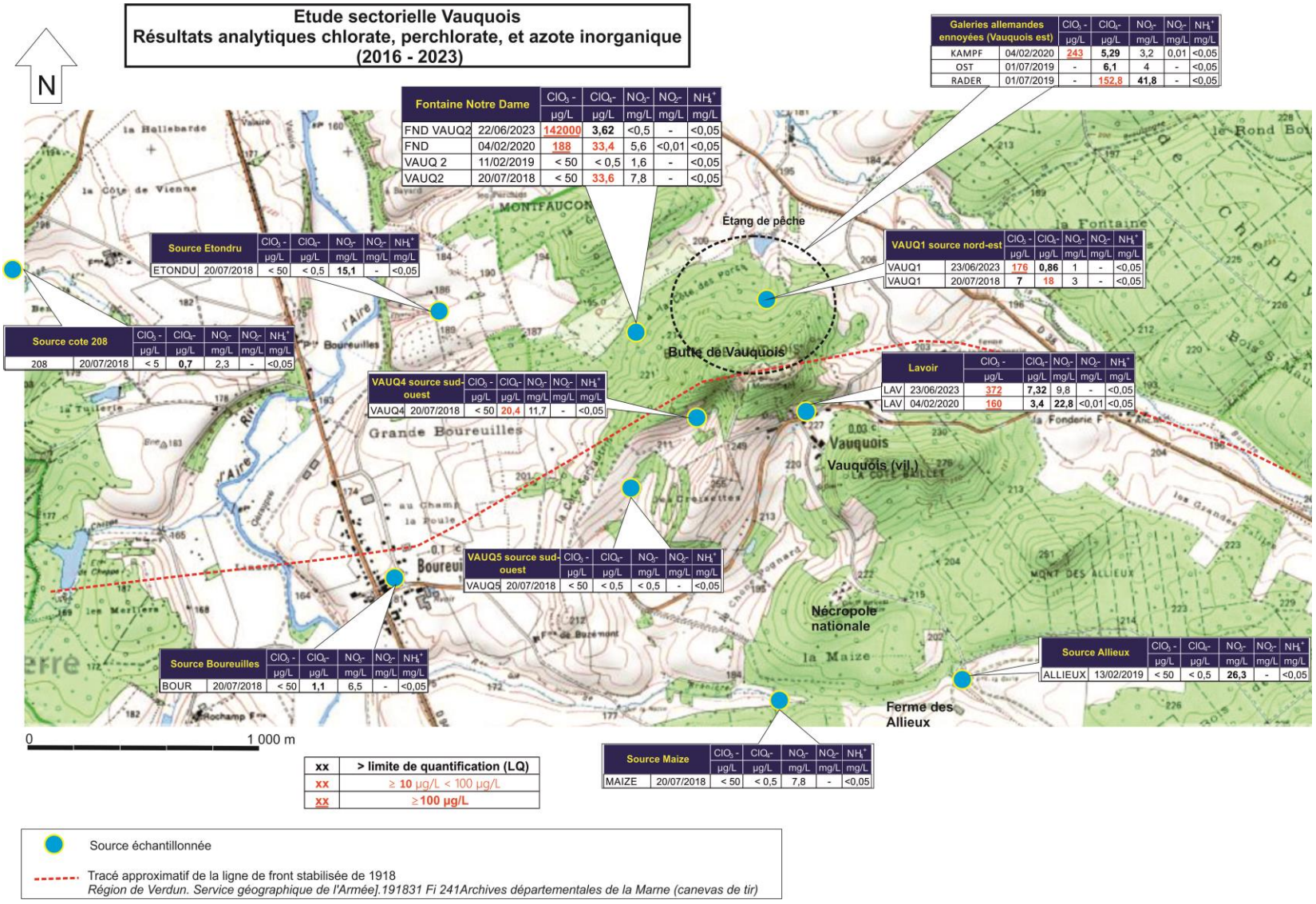


Figure 408 : Distribution des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des eaux dans le secteur de Vauquois (2016-2023).

Etude sectorielle Vauquois
Résultats analytiques nitroaromatiques
(2019 - 2023)

Fontaine Notre Dame	juil-19	juin-23
2-Nitrotoluène	Traces	64
3-Nitrotoluène	<10	120
4-Nitrotoluène	<5	390
2,3-Dinitrotoluène	50	4100
2,4-Dinitrotoluène	<5	15
2,5-Dinitrotoluène	47	220
2,6-Dinitrotoluène	176	2200
3,4-Dinitrotoluène	<5	11
3,5-Dinitrotoluène	<5	99
1,3-Dinitrobenzène	<10	23
1-Nitronaphtalène	<2	2,9
1,3-Dinitronaphtalène	1,1	< 1
2-Nitrophenol	-	< 20
Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	106	< 10
2,4,6-Trinitrotoluène	128	< 20
somme des nitroaromatiques	507	7244,9

	VAUQ1 (juin 2023)
2-Nitrotoluène	3,3
3-Nitrotoluène	< 10
4-Nitrotoluène	16
2,3-Dinitrotoluène	180
2,4-Dinitrotoluène	< 5
2,5-Dinitrotoluène	19
2,6-Dinitrotoluène	170
3,4-Dinitrotoluène	< 5
3,5-Dinitrotoluène	13
1,3-Dinitrobenzène	11
1-Nitronaphtalène	< 2
1,3-Dinitronaphtalène	< 1
2-Nitrophenol	25
Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	< 10
2,4,6-Trinitrotoluène	< 20
somme des nitroaromatiques	437,3

	LAV (Lavoir)	LAV (Lavoir)	LAV2 (Lavoir)
Date du prélèvement	juil-19	juin-23	juin-23
2-Nitrotoluène	4	15	30
3-Nitrotoluène	<10	31	83
4-Nitrotoluène	<5	110	300
2,3-Dinitrotoluène	23	640	6800
2,4-Dinitrotoluène	<5	12	8,9
2,5-Dinitrotoluène	<2	65	400
2,6-Dinitrotoluène	88	700	6500
3,4-Dinitrotoluène	<5	6,1	42
3,5-Dinitrotoluène	<5	71	320
1,3-Dinitrobenzène	10	< 10	100
1-Nitronaphtalène	<2	< 2	5,6
1,3-Dinitronaphtalène	<1	< 1	< 1
2-Nitrophenol	-	< 20	< 20
Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	37	< 10	14
2,4,6-Trinitrotoluène	< 20	< 20	-
somme des nitroaromatiques	162	1650,1	14603,5

xx	> limite de quantification (LQ)
xx	≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xx	≥100 ng/L

Source échantillonnée

Tracé approximatif de la ligne de front stabilisée de 1918
Région de Verdun. Service géographique de l'Armée].191831 Fi 241Archives départementales de la Marne (canevas de tir)

Figure 409 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques (avec au moins un positif) des eaux dans le secteur de Vauquois (2019-2023).

3.2.9 Isotopes stables de l'oxygène et de l'azote dans les ions nitrate (NO_3^-) des eaux des secteurs de l'Argonne et de Vauquois

Les résultats des analyses isotopiques $\delta^{15}N$, $\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$ des ions nitrate (NO_3^-) réalisées sur 10 échantillons d'eau des sources des secteurs de l'Argonne et de Vauquois ont été rassemblés (i) dans le tableau placé en annexe du présent manuscrit et (ii) dans le graphique $\delta^{18}O$ versus $\delta^{15}N$ de la Figure 410 ci-dessous (points jaunes (Vauquois) et bleus (Argonne)). Ont été aussi rassemblés dans ce graphique les résultats des analyses isotopiques effectuées sur les poudres et explosifs dans le cadre de cette recherche (cf. Section du volet historique du présent manuscrit). Les points verts sont ceux présentant un $D^{17}O$ compris entre 1 et 2, et ceux en rouge un $D^{17}O$ très élevé, compris entre 2 et 5. Il s'agit des échantillons très enrichis en isotopes légers ^{17}O de l'oxygène. Figure par ailleurs sur ce graphes les différents domaines $\delta^{15}N$ / $\delta^{18}O$ caractéristiques des différentes sources en azote[2059].

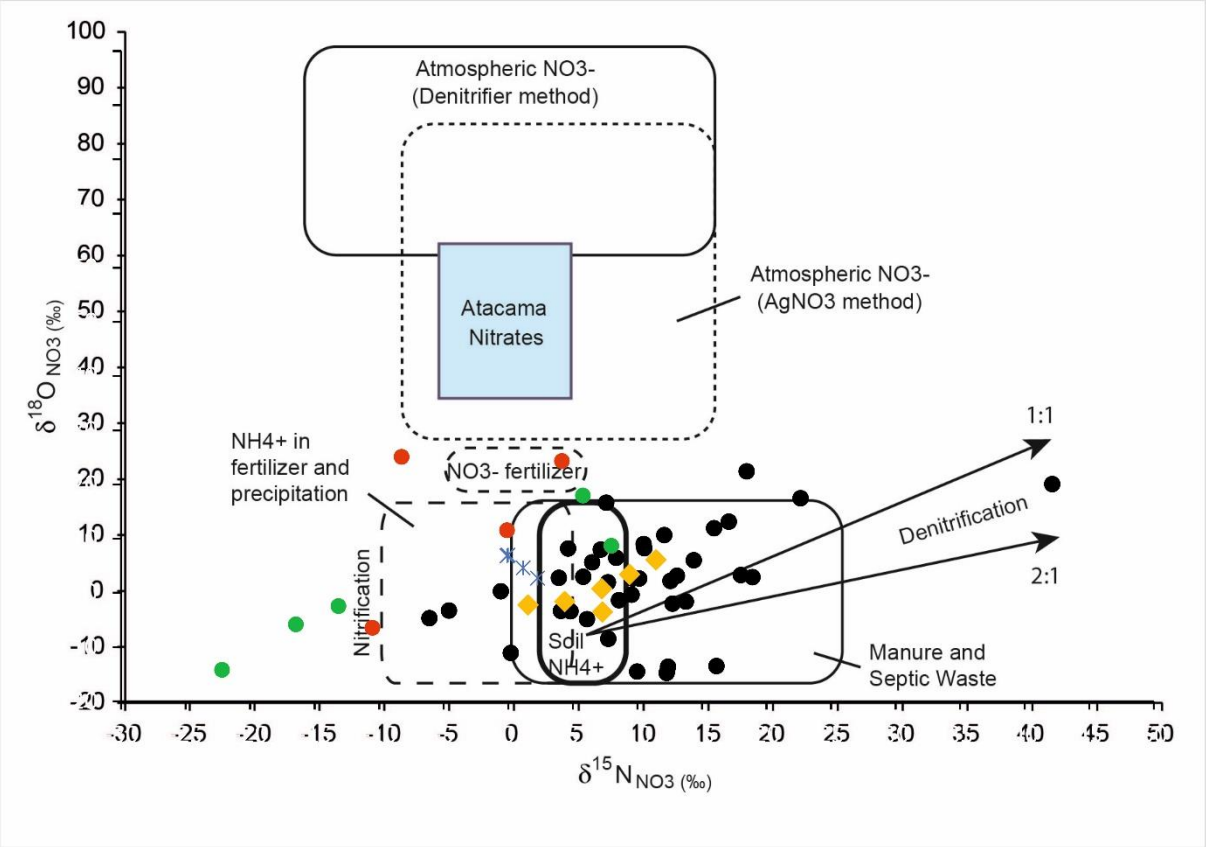


Figure 410 :, $\delta^{18}O$ versus $\delta^{15}N$ des eaux des sources échantillonnées dans les secteurs de l'Argonne et de Vauquois (points jaune (Vauquois), croix bleues (Argonne)). En vert, rouge et noir : les signatures isotopiques des explosifs analysés dans le cadre de cette recherche (cf. Section 1h du présent manuscrit).

On constate que les couples $\delta^{18}O$ / $\delta^{15}N$ se positionnent tous dans le domaine des nitrates du sol, dans lequel les signatures isotopiques initiales caractérisant les origines sont effacées par le recyclage de l'azote par les différents processus physico-chimiques et microbiologiques impliquant l'azote dans le sol.

[2059] Jung, Hyejung & Koh, Dong-Chan & Kim, Yun & Jeen, Sung-Wook & Lee, Jeonghoon. (2020). *Stable Isotopes of Water and Nitrate for the Identification of Groundwater Flowpaths: A Review. Water*. 12. 138. 10.3390/w12010138.

Ces analyses ne permettant donc pas d'identifier la source de l'azote des nitrates dans ces eaux. On rappelle que les secteurs de Vauquois et de l'Argonne se caractérisent par un environnement forestier pour lesquels deux origines de l'azote peuvent être envisageables (i) nitrates atmosphériques et (ii) nitrates provenant des poudres et explosifs historiques résiduels nitratés.

3.3. LE FRONT DES VOSGES. ETUDES SECTORIELLES AU LINGEKOPF ET A LA CHAPELOTTE

3.3.1 Contexte historique général

Se battre en montagne

Le front des Vosges fut singulier à l'échelle du front occidental de la Grande Guerre car il s'agissait du seul tronçon du front où les combats se déroulèrent en altitude et en montagne. La guerre de montagne y prit une physionomie très spécifique, adaptée au relief, au climat extrême, à l'accessibilité du front sur les deux versants, et à la durée et l'âpreté exceptionnelles des affrontements. La guerre en montagne n'était pas celle des plaines.

On retrouve en montagne un environnement forestier où, comme en Argonne, faire la guerre s'avère complexe. La présence des grands arbres « cathédrales » des forêts vosgiennes ainsi que le relief accidenté firent obstacle aux projectiles tirés selon des trajectoires tendues. L'emblématique canon de campagne français de 75 mm s'avéra dans ce contexte inopérant. Ainsi, le 3 mars 1915, à La Chapelotte, un obus de 75 mm toucha un arbre et explosa au-dessus d'une tranchée française tenue par le 37e Colonial, mettant hors de combat 18 hommes. L'artillerie de tranchée à tir en cloche fut alors très utilisée dans les combats en montage et sur des terrains escarpés (Argonne, etc.).

La présence du relief et des sous-bois étaient propices aux embuscades et à la préparation discrète d'offensives surprises. Les dépôts de munitions pouvaient aussi être aisément dissimulés. La pente entravait le déplacement des troupes et matériels. Des routes et des pistes sont construites, mais aussi des téléphériques, des funiculaires. Mais c'est le transport à dos de mules, de cheval, le trait par des bœufs roumains qui va s'avérer le plus efficace. Les Chasseurs alpins adaptèrent les techniques de combat aux reliefs et aux conditions climatiques, en faisant appel au ski pour charger, les chiens de traineau pour déplacer troupes et matériels.

La mise en place du front en Alsace et dans le massif des Vosges (1914-1915)

Sur le plan militaire, l'Alsace fut stratégiquement un théâtre des opérations secondaire comparativement à d'autres secteurs actifs du front occidental, Allemands et Français, restaient confiants sur le rôle de barrière naturelle joué par le massif des Vosges, difficilement franchissable avec d'importants moyens militaires et logistiques, un dispositif défensif naturel renforcé à l'ouest, côté français, par une frontière d'acier, formée d'un chapelet de fortifications Séré-de-Rivières, courant de Belfort à Verdun. Malgré cela, la libération de l'Alsace devint un enjeu symbolique et psychologique, plus que stratégique, par la reconquête des territoires perdus en 1870.

Ainsi, le général Joffre, à la tête du GQG intégra dans son plan d'attaque (Plan XVII) une offensive en Alsace et en Moselle. Il attaqua en août 1914 vers Mulhouse (première offensive en Haute-Alsace, du 4 au 13 août 1914) et Strasbourg (Ire Armée du général Dubail, via la vallée de la Bruche), et plus au nord en Lorraine (vers Morhange, Sarrebourg, l'offensive de Lorraine du général de Castelnau à la tête de la IIe Armée).

Les opérations militaires en Alsace furent d'abord couronnées de succès. L'Armée d'Alsace du général Pau, lança l'offensive en Haute-Alsace le 14 août 1914. Les Brigades de Chasseurs Alpins (BCA) passèrent le col frontière de la Schlucht et attaquèrent en direction de Münster. Le col de Bussang fut aussi franchi. Les BCA empruntèrent la vallée de la Thur et avancèrent vers Cernay après que Thann eut été évacuée par les Allemands.

Le lendemain, le général Pau lança la grande offensive depuis Belfort selon trois axes de progression. L'offensive surprit les Allemands qui refluèrent vers le nord, en abandonnant sur place vivres et matériel. Les Français progressèrent et dépassèrent Munster. Le 18 août, le général Pau, ordonna d'attaquer sur l'intégralité du front avec pour objectif la ligne de la rivière Ill (ligne Altkirch-Mulhouse-Colmar), puis l'avancée sur Huningue, Chalampé et Neuf-Brisach. Le 19, tout le front s'embrasa en Alsace. Les Allemands offrirent une résistance acharnée autour de Mulhouse, mais débordés, quittèrent la ville, alors réoccupée pour la seconde fois par les forces françaises. Les 20 et 21, les Français progressèrent encore en direction du Rhin et de Colmar, tandis qu'ils se retranchèrent aussi à Mulhouse.

Mais voilà, la situation générale de l'Armée française en Lorraine, dans les Ardennes et dans le Nord, ayant tourné au désastre (au terme de la bataille de frontières), l'Etat-major complètement dépassé ordonna la retraite de la IIe Armée de De Castelnau, entrainant par effet de levier celle de l'Armée d'Alsace. Joffre fut contraint de prélever d'importantes troupes stationnées dans les Vosges et en Alsace pour les projeter dans les batailles de Picardie, de Champagne et préparer, sur l'intuition de Gallieni, la contre-attaque sur la Marne. Le 20 août 1914 De Castelnau ordonna le repli général sur la rivière Meurthe pour organiser la défense de Nancy sur le Grand-Couronné. Le 22, les Français se battirent encore à Ingersheim, aux portes est de Colmar. Après une contre-attaque, les Allemands furent contraints au retrait. Colmar et le Rhin étaient à portée de main des Français. Le 28 août 1914, Joffre dissolut l'Armée d'Alsace et la remplaça par deux groupements, (i) celui de Belfort dont la mission était de tenir la trouée et (ii) celui des Vosges chargé de tenir la frontière.

Dans les Vosges et en Alsace, les Français abandonnèrent les terrains conquis. Le général Pau laissa aux Allemands Mulhouse, Altkirch, Cernay mais souhaita conserver le contrôle des vallées vosgiennes, ainsi qu'une partie du Sundgau (entre Cernay et la frontière franco-suisse).

Les Allemands accélérèrent alors la manœuvre et acculèrent les Français. Le 7 septembre, ils reprenèrent Cernay et menaçèrent Thann. Le 11, ils lancèrent une offensive pour s'emparer de la vallée de la Thur. Au même moment d'autres combats eurent lieu dans les Vosges autour de Fraize et le col de Mandray pour le contrôle du col du Bonhomme, bombardé depuis les positions d'artillerie allemandes de la Tête des Faux. Le 11, ils lancèrent une offensive pour s'emparer de la vallée de la Thur. Mais c'était alors au tour des Allemands de dégarnir le front vosgien de leurs troupes. En effet la contre-offensive générale de l'Armée française sur la Marne de début septembre 1914 obligea l'OHL (*Oberste Heeresleitung,* grand quartier général allemand) à prélever d'importants contingents sur le front lorrain et des Vosges pour acheminer des renforts vers la Marne. Les Armées allemandes stoppèrent leurs offensives et se replièrent, permettant par là même aux Français de réoccuper Saint-Dié, Raon-l'Etape, la vallée de la Meurthe.

Au terme de ces flux et reflux des confrontations armées d'août et septembre 1914, les parties belligérantes arrivèrent à un *statu quo*. Le front se stabilisa du col du Bonhomme à Nomény en passant par le col des Bagenelles, la Tête du Violu, le col de Sainte-Marie, le Ban-de-Sapt, Senones et le col de La Chapelotte (cf. Figure 413). Hormis les combats de la Fontenelle et du col de La Chapelotte, ce front restera relativement calme et stable jusqu'à l'armistice. Plus au sud, le front se figea aussi dans le secteur de la Fecht et de Munster (cf. Figure 412). Les Français occupèrent les crêtes du lac Blanc jusqu'au Hohneck, alors que les Allemands occupaient l'entrée des vallées de Munster et Guebwiller. Une ligne de front s'était établie de manière discontinue sur les hauteurs jouxtant ou se confondant peu ou prou avec le tracé de l'ancienne frontière entre la France et le *Reichsland* d'Alsace Lorraine. Quelques villages et vallées au sud du massif redevinrent français alors que Saint-Dié, sur le versant lorrain, connut l'occupation allemande. Une partie du Sundgau était alors la seule partie du *Reich* tenue par les Français. Le front alsacien connut alors temporairement un calme relatif. La guerre dans les Vosges connut alors, à l'instar du reste du front occidental, une nouvelle phase, celle de la guerre de siège et de position. Les adversaires saisirent cette opportunité du répit pour mieux s'organiser défensivement avec des tranchées, des fortifications, avec toute leur logistique. C'est particulièrement le cas des Allemands, décidés coute-que-coute à défendre sur leurs frontières de 1870, leur sol national. L'année 1915 fut dans le massif des Vosges, comme en Artois, en Champagne ou encore en Argonne, celui des grands assauts pour tenter de reprendre la guerre de mouvement et ne pas s'engluer dans les tranchées. Début 1915, Joffre souhaitait reprendre l'offensive sur le front occidental et rompre l'immobilisme. A cet effet il demanda au général Louis Blazer (BCA) de s'emparer du Lingekopf depuis les positions françaises de la ligne Reichackerkopf-Stosswihr-Hohrod-Hohrodberg-Barrenkopf pour maîtriser ces hauteurs qui dominaient la plaine d'Alsace. Mais les Allemands prirent les premiers l'offensive entre le 19 et le 24 février, obligeant les Français à abandonner le Reichackerkopf, Stosswihr, Hohrod, Hohrodberg et le Barrenkopf. Entre mars et juin 1915, ils fortifièrent leurs conquêtes de réseaux de tranchées bétonnées, de blockhaus et abris, de voies de communication avec l'arrière et de toute la logistique de guerre (eau, électricité, communications…). A l'arrière de ces fortifications de circonstance, le *Rain des Chênes* fut transformé en position d'artillerie (cf. Figure 413).

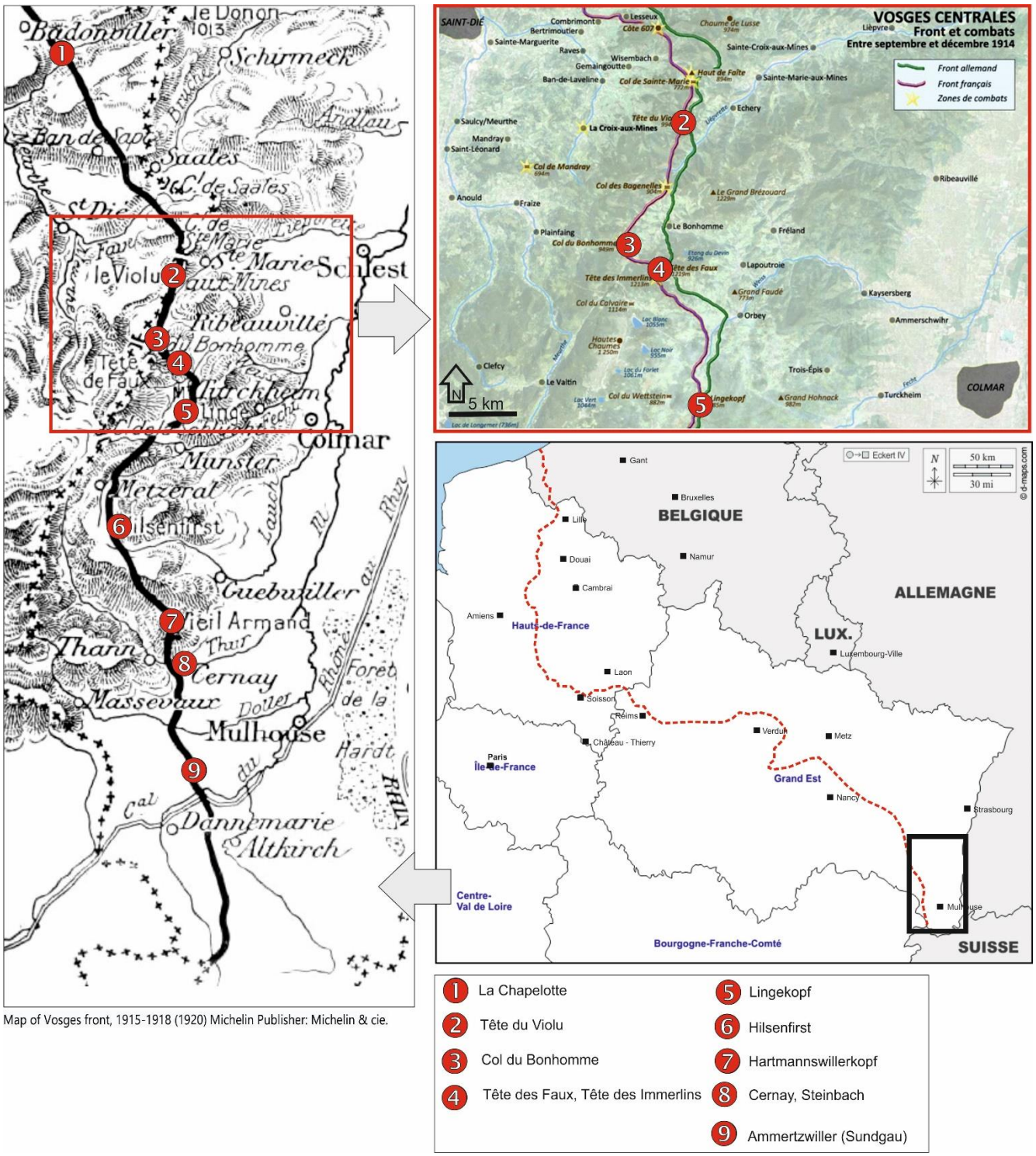
En avril, Joffre décida de prendre Munster, avec préalablement celle des sommets dominant la ville, notamment le massif du Linge. Le tout nouveau commandant de la 47e D.I., le général Gaston d'Armau de Pouydraguin (cf. Figure 411 ci-contre) se montra à l'Etat-Major extrêmement réticent à l'idée de Joffre, estimant inutile la prise des sommets, d'autant que le chaînon du Lingekopf n'ouvrait aucun accès direct sur la plaine et ne commandait ni col stratégique ni route importante.

Après un premier échec sur Munster en avril, les Chasseurs Alpins parvinrent à la mi-juin, au bout d'une semaine de féroces combats, à progresser de 5 km vers Munster en prenant Metzeral et Sondernach. Au prix de la perte de 6 800 hommes, la ville fut à la portée des Français.

Figure 411 : Le Général d'Armau de Pouydraguin au Linge, janvier 1916[2060].

[2060] La Contemporaine. L'Argonnaute. Fond Valois, référence VAL 531/147. 30 janvier 1916.

De Pouydraguin s'apprêta à concrétiser son projet. Mais Joffre s'entêta à l'idée d'une offensive par les hauteurs. Faisant fi des réticences unanimes de ses subordonnés, il ordonna la prise du Reichackerkopf côté sud (au sud-ouest de Munster) et du Lingekopf côté nord. Dès le départ, l'opération fut promise à l'échec: la conception tactique dite « manœuvre de débordement par les hauts », chère aux théoriciens du haut commandement des années 1914 ne pouvait réussir que si elle bénéficiait de son atout majeur : un rapide effet de surprise. Or, les Allemands étaient prêts, bien retranchés, attendant les assauts français.



Map of Vosges front, 1915-1918 (1920) Michelin Publisher: Michelin & cie.

Figure 412 : Position du front dans les Vosges et d'Alsace.

3.3.2 Secteur du Lingekopf

Géographie du secteur d'étude

Le secteur d'étude couvre une superficie d'environ 20 km (est / ouest) sur 15 km (nord / sud), soit 300 km^2. Il est centré sur le massif du Linge-Schratzmännerlé. Ce massif est structuré par une crête globalement orientée ouest-sud-ouest / est-nord-est et culmine avec + 987 m NGF au Grand Hohnack. Au nord, il redescend en pente douce vers le paysage ouvert du secteur d'Orbey et Labaroche, alors que son versant sud est abrupt, et plonge vers la vallée de Munster par Hohrod, Hohrodberg, Soultzeren.

Contexte géologique et hydrogéologique

Ce secteur s'inscrit dans la partie centrale du massif vosgien principal (Vosges moyennes) où prédominent très largement des terrains granitiques et cristallophylliens. D'un point de vue géologique, le secteur d'étude est marqué par la présence de deux ensembles : le socle hercynien cristallophyllien et l'entablement gréso-conglomération du *Buntsandstein* (Trias inférieur) reposant en discordance sur ce socle. Le socle cristallophyllien possède une pétrographie et une structure complexes, marqué par une succession de lames granitiques formées de roches possédant des textures, granulométries et compositions qui diffèrent sensiblement (Granite à biotite, Granite de l'Altenberg, Granite du lac Vert, Granite des Crêtes (s. s.) et autres granites à amphibole). Les assises triasiques gréseuses se situent dans des panneaux tectoniques très nettement en contrebas de la crête principale des Vosges. La pile stratigraphique triasique débute par des grès argileux, surmontés par le Grès vosgien *sensu stricto* qui présente ses faciès classiques, principalement le faciès de « haute masse », en bancs de 0,5 à 4 m, à stratifications souvent obliques (entrecroisées). En se chargeant en galets, le Grès vosgien passe dans sa partie sommitale au Conglomérat principal (ou « poudingue »). Il s'agit d'un conglomérat polygénique constitué de galets de quartz, de quartzite et de rares galets de lydienne, très dur, qui se détache en relief dans le paysage (à l'origine de paysages ruiniformes comme dans le « Pays des Rochers » des Vosges du nord).

L'entablement gréseux triasique constitue le réservoir d'une nappe d'eau qui donne naissance à de nombreux exutoires (sources) qui se situent dans la majorité des cas dans les zones d'affleurement du Grès vosgien, dans des niveaux d'éboulis plus ou moins argileux, parfois au toit de formations de fonds de vallons ou alluviales, parfois encore au toit des niveaux du Permien (argilo-sableux formant l'assise des formations gréseuses triasiques). Les débits de ces sources sont généralement faibles en étiage; pourtant certaines sources ont été captées pour des EDCH. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux s'inscrivent entre les extrêmes suivants: pH : 5,8 à 6,2; dureté : 0° 5 à 5° français. Elles sont faiblement minéralisées.

Faits et évènements historiques notoires

- **La Bataille du Lingekopf (juin à octobre 1915)**

L'attaque de cette position allemande fut confiée à la 3e BCA (dont les « Diables Bleus ») soutenus par 236 pièces d'artillerie. Côté allemand, trois divisions bavaroises de *Jäger* (Chasseurs) engageaient successivement sept brigades. La première attaque eut lieu dans la nuit du 19 au 20 juin. Elle se solda par un échec qui mit à mal la stratégie française qui misait tout sur l'effet de surprise. Deux fois repoussée, la seconde offensive du 20 juillet échoua elle aussi devant le Lingekopf et sur les pentes du Schratzmännelé (cf. Figure 413). Même échec le surlendemain : décimés et malmenés, les Chasseurs furent rejetés sur leurs bases de départ.

Le 21, l'offensive voisine du Reichackerkopf fut abandonnée, condamnant ainsi toute l'opération voulue par Joffre. Les généraux continuèrent et s'obstinèrent. Nouvelle attaque de grande ampleur le 26 : toute la crête du Lingekopf fut enlevée jusqu'au Collet par les unités françaises qui repoussèrent plusieurs contre-offensives, alors que l'artillerie allemande se déchaina sur les arrières français du Hurlin et du Wettstein. Le 27, les Allemands pilonnèrent les positions que les Français avaient pris la veille, causant de sévères pertes. Deux de leurs contre-attaques furent repoussées, mais ils parvinrent à leur tour à repousser une offensive française sur le Schratzmännelé et le Barrenkopf. Les *Jäger* Mecklembourgeois parvinrent même jusqu'au Collet avant d'être stoppés.

Contrarié, Joffre demanda que l'offensive soit relancée : le 29 un assaut français sur le Schratzmännelé depuis le Collet du Linge fut repoussé par les *Jäger* de la Garde et le lendemain le Lingekopf fut pilonnée par l'artillerie allemande. Le 1er août Nollet déclencha une nouvelle offensive sur un large front devant s'emparer du Schratzmännelé, du Barrenkopf et des carrières. La progression française fut bloquée au pied des sommets. Les attaques reprirent les 2 et 3 au matin, en vain. L'artillerie française tenta alors de réduire les blockhaus sommitaux du Schratzmännelé et du Barrenkopf.

Le 4 août, l'artillerie allemande déclencha un bombardement intensif (préparation d'artillerie) sur les positions françaises : 40 000 obus furent tirés sur un front de seulement 3 km. A 16h30 débuta l'assaut allemand sur le front Collet du Linge-Lingekopf. Le sommet du Linge fut pris, mais les Chasseurs parvinrent à maintenir leurs positions. Les contre-attaques françaises échouèrent et le 30e bataillon de Chasseurs fut presque anéanti. Brissaud et Nollet demandèrent une pose, mais le chef de la VIIe Armée, le général Louis Ernest de Maud'Huy ordonna de tenir à tout prix et promit des renforts. Le lendemain, les *Jäger* prirent le blockhaus du Collet, mais en furent chassés par une contre-attaque des BCA qui y parvinrent mais sans pouvoir le conquérir.

Le 6 août, la D.I. du général Nollet fut relevée par celle du général d'Armau de Pouydraguin. Entre le 7 et le 23 de nombreux assauts de part et d'autre s'achevèrent tous par des échecs. Le 22 août, après une préparation d'artillerie, les Chasseurs s'emparèrent des blockhaus du sommet du Schratzmännelé et le 23 de ceux du sommet du Barrenkopf : ils tinrent alors le Collet du Linge, la crête du versant ouest du Schratzmännelé et du Barrenkopf, alors que les Allemands tinrent le versant est. Les pentes des ballons se commuèrent en champs de trous et de bosses d'où toute végétation disparait. L'offensive fut arrêtée. Et Munster, objectif convoité, n'était toujours pas libérée.

Le 31 août, après une préparation d'artillerie soutenue, impliquant des obus chimiques (dont des engins lacrymogènes) ainsi que l'intervention de l'aviation, une puissante attaque allemande parvint à s'emparer du Collet du Linge et à le tenir malgré les contre-attaques françaises. Le 9, une nouvelle offensive allemande fut lancée et visa le Schratzmännelé. Il fut fait usage de projectiles chimiques et de lance-flammes. Les Français reculèrent, même s'ils parvinrent à conserver le sommet. Mais le 12 octobre, une attaque allemande au lance-flamme et aux gaz s'empara de la première ligne française, entre le Collet du Linge et le sommet du Schratzmännelé. Le lendemain 13, à 3 heures du matin, une contre-attaque de deux bataillons français échoua, suivie d'une ultime et vaine tentative allemande le 16 octobre.

Offensives et contre-offensives successives ne débouchèrent pour aucune des parties sur des gains territoriaux significatifs. Le front se figea alors en octobre 1915 au Collet du Linge, qui fut sobrement nommé le « Tombeau des chasseurs ». En effet, les fautes tactiques et l'entêtement du haut commandement français coûtèrent la vie à 10 000 soldats côté français. Côté allemands, le nombre de perte s'éleva à 7 000. Pour le GQG, le Linge n'était plus qu'un « point de friction classé ».

Le relief et l'indéniable supériorité de l'artillerie allemande ne permettaient plus à l'Etat-Major français d'espérer déborder les lignes allemandes par des attaques brusquées sans une importante augmentation des moyens humains et matériels et l'acceptation de grandes pertes en vies humaines. Chacun s'organisa défensivement. Jusqu'à la fin de la guerre; seuls quelques coups de mains sporadiques et duels d'artillerie vinrent troubler ces sommets. Fin juillet 1918, la situation des Français au Linge devint de plus en plus précaire car les Allemands occupaient la crête au-dessus des positions françaises, en éliminant petit à petit les éléments français qui étaient restés sur les pentes ouest.

Profitant de la supériorité que leur donnait la possession des hauteurs topographiques, les Allemands bombardèrent systématique les Français au moyen de projectiles lourds de type *Minenwerfer* (lance-bombes ou mortier), chassant les Français qui se replient presque en bas des pentes. Les abris furent aussi broyés par le feu ennemi.

- **Le tunnel « Caudriller »**

Au Linge, contrairement à d'autres secteurs du front au relief marqué comme au col de La Chapelotte, les forces en présence ne pratiquèrent pas de guerre de mines. Bien que le secteur soit escarpé, favorisant l'ouverture de galeries par les flancs, les terrains granitiques et métamorphiques, très indurés, du champ de bataille du Linge ne se prêtaient pas au creusement. Toutefois, une longue galerie de 800 m, dénommée *« Tunnel Caudriller* », qui avait une double fonction (i) logistique, pour la circulation des hommes et matériels à l'abri des observateurs et des projectiles et (ii) le drainage des eaux qui sourdaient au contact entre le granite et le Grès vosgiens et qui détrempaient les tranchées françaises plus en contrebas. En juin 1917, le tunnel était percé. A peine creusé, les militaires pensaient déjà aux moyens de le détruire, avec notamment l'installation d'un dispositif de destruction, pour anticiper une éventuelle prise du tunnel par les forces adverses. Des travaux des chambres de mines (fourneaux) commencèrent et se terminèrent le 08 septembre 1917. Pendant le premier semestre 1918, des travaux d'entretien et d'aménagement du tunnel se poursuivirent. Mi-avril 1918, le capitaine du Génie d'une unité fraichement débarquée se rendit au Linge pour visiter le tunnel et vérifier l'installation des dispositifs de destruction. Il adressa à ce sujet un rapport au commandant du Génie divisionnaire le 16 avril ; quinze jours plus tard, les travaux de minage furent entrepris avec le bourrage de 17 fourneaux. Ces fourneaux furent dotés d'un dispositif de mise à feu électrique et pyrotechnique similaire à celui des charges des mines de sape. Suite au pilonnage allemand de l'été 1918, qui fragilisa les positions françaises, il fallut détruire le tunnel avant que l'ennemi ne s'y engouffrât. Cette proposition de bon sens ne fut finalement pas retenue. Le mot d'ordre était de tenir. Mi-août 1918, les troupes françaises des Vosges furent relevées par les américains de l'AEF (*American Expeditionary Forces*) qui poursuivirent à leur tour l'entretien du tunnel. Les Français reprennèrent possession des lieux en octobre 1918, avec à l'ordre du jour toujours la lancinante question de la réorganisation du Lingekopf, position devenue stratégiquement secondaire mais chère en pertes humaines. La décision fut prise d'obturer la galerie « Varennes » (le Tunnel du Linge) sans l'endommager. Ses extrémités furent rebouchées et la galerie ne devint dès lors plus accessible.

Il n'existe aucune indication relative à l'enlèvement des charges d'autodestruction. Il apparaît donc vraisemblable que les 17 mines chargées soient toujours enfouies dans le tunnel dont la position n'est pas connue avec certitude. L'entrée se situait côté Wettstein, la sortie débouchant sur le flanc ouest du Schratzmännele. Les fourneaux de mines français étaient traditionnellement chargés de *Cheddite* durant la Grande Guerre.

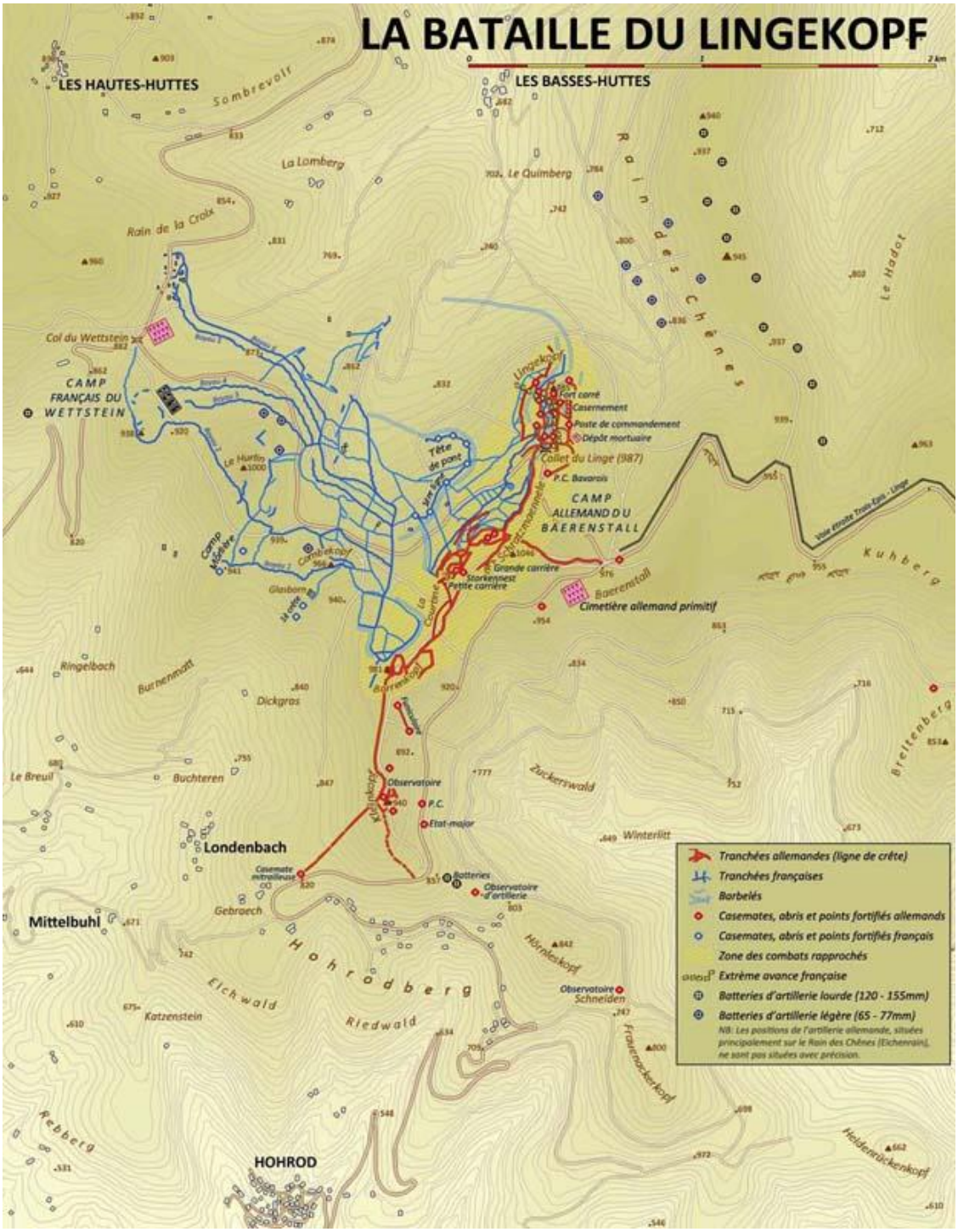


Figure 413 : Le champ de bataille du Linge et le réseau des tranchées principales[2061].

[2061] https://linge1915.eu/histoire-bataille-linge-alsace-vosges/ La bataille du Linge, un enfer sur les hauteurs. Mémorial du Linge.

- **Désobusage du champ de bataille**

Comme cela a été développé dans la Section 9h du volet historique du présent manuscrit, le massif des Vosges fut un territoire escarpé, difficile d'accès et qui n'a pas été, à l'exception des lieux destinés au tourisme de mémoire dès l'entre-deux-guerres (Linge, Hartmannswillerkopf), considérés comme non prioritaire pour la remise en état des sols post conflit et le désobusage, les peu de moyens alloués au service du désobusage du secteur (7e Région militaire) ayant été mobilisés par les opérations de rassemblement et de destruction de munitions de dépôts encombrant certains cols (Hantz, Donon, etc.) et les terres agricoles en plaine. Entre 1925 et 1927, il fut question à deux reprises de supprimer le service du désobusage dans le Haut-Rhin. Les maires des communes d'Hohrod et de Soultzeren, conscients de l'occurrence dans les sols de l'ancien champ de bataille du Linge d'importantes quantités de munitions, et ne souhaitant pas voir leurs responsabilités engagées, s'y opposèrent. Le Préfet maintint en définitive le service et demanda expressément l'enlèvement des obus restant dans ces communes de manière « *rapide et méticuleuse*[2062] ». Une nouvelle demande de suppression du service pour le 1er janvier 1927, exprimée par le Préfet le 30 septembre 1926 entraîna les mêmes réactions. Toutefois, la suppression fut mise à exécution en dépit des réclamations. Dans les années 30 l'organisation du désobusage fut modifiée et adaptée aux spécificités du territoire. Il est vraisemblable que des destructions de Restes Explosifs de Guerre aient été opérées à la faveur des travaux de remise en état des sols de l'ancien champ de bataille du Linge, visant des grenades et bombes de tranchées françaises comme allemandes chargées d'explosifs perchlorates et chlorates.

La consultation de photographies aériennes anciennes sur le secteur du Lingekopf n'a pas mis en évidence de traces de destruction de REG (entonnoirs d'éclatement). Les photographies aériennes datant de l'entre-deux-guerres sont rares (missions de 1935) et de mauvaise résolution.

Le Linge sera encore le théâtre d'opérations militaires durant le Second conflit mondial. Dans une note, le Colonel Sergent[2063] précise « *…et pourtant les mines étaient bien là, sous la neige ! Les Allemands ne les avaient pas enterrées dans le sol, et, si elles n'éclatèrent pas, nous le dûment à la neige qui les recouvrait et qui fit ressort. L'un d'entre nous qui repassa par-là quelques semaines plus tard, la neige ayant fondu, les vit sur le pré brillant sous le soleil. Il y en avait des dizaines de milliers…une tous les mètres* ».

Echantillonnage et analyses réalisés

L'échantillonnage fut réalisé en deux temps. Dans un premier temps, il fut procédé, après une phase de reconnaissance préliminaire sur le terrain afin de vérifier les débits (si les sources n'étaient pas taries) et l'accessibilité des sources, à un échantillonnage le plus exhaustif possible afin d'appréhender la distribution spatiale des ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium. Cette première phase concernant 10 sources, se déroula le 25/10/2017. Ces eaux furent prélevées et filtrées à 0,45 µm pour être ensuite conditionnées dans des flacons de 100 mL en PE puis analysées au laboratoire du BRGM selon des protocoles analytiques décrits dans ce qui précède.

[2062] Archives départementales du Haut-Rhin, site de Colmar, cote 3 AL 2 – 399. Lettre du 19 avril 1926.

[2063] *La conquête du Linge en 1945*, In *Chasseurs et artilleurs, dans un même combat pour vaincre*. Mémorial du Linge, Colmar, éditions d'Alsace, 1986.

Au regard des résultats de la première phase, un échantillonnage sur un lot restreint d'échantillons fut réalisé dans un second temps. Les sources montrant les concentrations les plus élevées en ions perchlorate et/ou des anomalies hydrochimiques furent privilégiées. D'autres points de cette seconde campagne eurent aussi pour vocation à mieux circonscrire des zones anomaliques. Le programme analytique de la première campagne fut complété par l'analyse des métaux (Cd, Cr, Hg, Pb, Zn) et métalloïdes (As, Se), des cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) et anions majeurs (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-), certains éléments traces (Li, B, Br, iodure) (sur des eaux filtrées à 0,45 µm). Ces ions et éléments furent analysés au laboratoire du BRGM selon des protocoles analytiques décrits dans ce qui précède.

Les NAC et leurs sous-produits de transformation environnemental furent aussi recherchés sur les eaux brutes (échantillons de 2 x 1 L en verre brun) par le laboratoire Envilytix GmbH (avec une limite de quantification de 0,1 µg.L^{-1}). Ces huit échantillons ont été collectés en juin 2018. Le detail des informations relatives à l'échantillonnage et aux protocoles analytiques appliqués sur ce secteur d'étude peut être consulté dans Hubé D. (2019)[2064]. Trois échantillons provenant de sources pour l'EDCH situées sur le territoire de la commune d'Hohrod furent intégrées au programme d'échantillonnage du PRSE3 de l'ANSES (échantillonnage des eaux brutes et distribuées le 11/01/2021) pour l'analyse par le LHN des composés organiques nitroaromatiques selon le protocole analytique décrit dans ce qui précède.

Résultats

Les ions perchlorate ont été détectés en octobre 2017 dans six sources sur les 10 échantillonnées ; une seule valeur excède les 10 µgClO_4^-·L^{-1}et la valeur recommandée dans l'eau de boisson de l'ANSES pour la population générale (avec 17,9 µgClO_4^-·L^{-1}au niveau de la source Obergunsbach à Hohrod) (cf. Figure 414). Les autres valeurs sont toutes inférieures à la valeur recommandées dans l'eau de boisson de l'ANSES pour la population sensible (fixée à 4 µgClO_4^-·L^{-1}). Ce constat (occurrences comme gammes de valeurs) reste cohérent avec celui mis en évidence par les mesures de l'ARS en 2014 et 2015 (avec des concentrations maximales mesurées de 22,5 µgClO_4^-·L^{-1}dans le secteur de Hohrod / Hohrodberg). A l'exception de traces locales d'ions chlorate[2065], aucune anomalie hydrochimique autre que l'occurrence des ions perchlorate n'a été constatée dans le secteur d'étude. Les composés traceurs des poudres et explosifs et leurs sous-produits de transformation n'ont pas été détectés à des concentrations supérieures à la limite de quantification appliquée par le laboratoire Envilytix GmbH (0,1 µg.L^{-1}) en 2018. Les analyses réalisées par le LHN sur trois EDCH d'Hohrod échantillonnées en janvier 2021 ne mirent pas en évidence l'occurrence de NAC dans le secteur. En conclusion, le marquage des eaux du champ de bataille du Lingekopf apparaît donc très ponctuel, par la présence anomalique des seuls ions perchlorate à des concentrations inférieures à 5 µgClO_4^-.L^{-1} lorsqu'ils sont quantifiés. Un seul point, la source Obergunsbach, située à la base de l'entablement gréseux triasique, au contact du socle cristallophyllien, en contrebas du champ de bataille (Schratzmaennele et Barrenkopf) et du tunnel Caudriller, est marquée à plus de 15 µgClO_4^-.L^{-1}.

[2064] Hubé D. (2019). *Recherche de l'origine de l'empreinte perchloratée des eaux du Massif des Vosges. Etudes sectorielles (54,68)*. Rapport final. BRGM/RP-68790-FR, 196 p., 56 fig., 18 tabl., 3 ann., CD.

[2065] A des concentrations très largement inférieures à la concentration limite dans l'eau de boisson de l'Organisation Mondiale de la Santé fixée à 700 µgClO_3^-.L^{-1}.

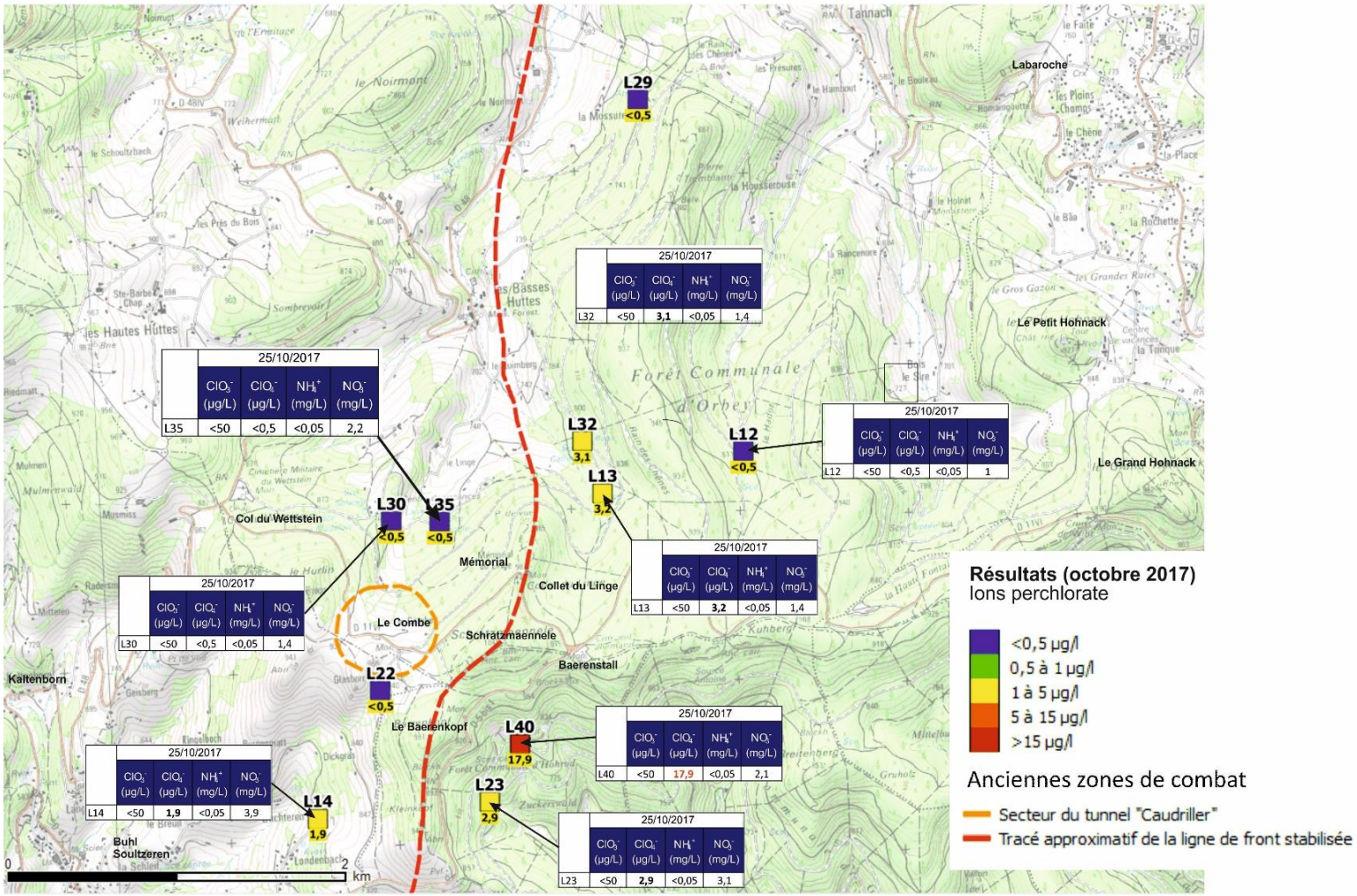


Figure 414 : Résultats analytiques des concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources échantillonnées dans le secteur du Lingekopf (octobre 2017). Cerclé d'orange, la position supposée du tunnel Caudriller.

3.3.3 Secteur de La Chapelotte

Géographie du secteur d'étude

Le secteur d'étude couvre une superficie d'environ 20 km (est / ouest) sur 15 km (nord / sud), soit 300 km^2. Il est centré sur le col de La Chapelotte ; il est bordé à l'ouest et au sud-ouest par le début du plateau lorrain (Badonviller) et le lac de barrage de Pierre-Percée. Sa limite est est constituée par la vallée de La Plaine. Les altitudes des monts et collines augmentent globalement en direction du nord-est avec des altitudes maximales aux alentours de + 650-670 m NGF.

Contexte géologique et hydrogéologique

Au niveau du secteur de La Chapelotte, les terrains à l'affleurement, sont attribués au Trias inférieur (*Buntsandstein* du Trias germanique) et correspondent à la succession suivante (de bas en haut) (i) Grès vosgien (*Bundsandstein* moyen), induré, est un grès feldspathique, rose, à grains bien arrondis, fins à moyens à ciment siliceux, à passées conglomératiques, (ii) Conglomérat principal (« *Poudingue* ») (*Bundsandstein* moyen), formé de graviers et galets polygéniques (quartz, quartzites, lydiennes, rhyolites, granites) bien roulés dans une matrice gréseuse rose. Cette formation joue un rôle morphologique essentiel dans le paysage gréseux car, de toute la puissante pile stratigraphique du *Buntsandstein,* c'est la plus résistante à l'érosion. Elle affleure principalement, profondément disséquée par un réseau hydrographique dendritique, sous forme de longues files de rochers formant falaises (à l'origine du Pays des Rochers dans les Vosges du Nord (Moselle)). Ces rochers ont subi des processus d'érosion météorologique et éolien qui ont creusé au sein de ces reliefs de nombreuses cavités ayant servi d'abris aux soldats durant la Grande Guerre (cf. Figure 415), (iii) les Couches intermédiaires (*Bundsandstein* supérieur), constituées de grains de quartz et en moindre mesure de feldspath, de granulométrie très variable. Les grains de ce grès rose à rouge lie-de-vin sont mal classés et nourris par un apport siliceux. La matrice est argilo-ferreuse. La puissance de cette formation est généralement très voisine de 50 m. Sa partie supérieure (Couches intermédiaires supérieures) se caractérise par la grande hétérogénéité des grès montrant par ailleurs de nombreuses intercalations lenticulaires argileuses.

Les grès argileux du *Buntsandstein* inférieur constituent le mur imperméable de l'important réservoir qui est largement sollicité. La nappe du Grès vosgien alimente une première ligne de sources qui apparait au toit des grès argileux du Permien, puis, plus haut dans la série géologique, une deuxième ligne de sources correspondant au toit du faciès Grès vosgien, à la base du Conglomérat principal. Les sources identifiées sur le secteur d'étude appartiennent à cette seconde ligne de sources *« perchées* » à l'exception des sources du champ captant d'Allencombe qui émergent au sein même des Grès Vosgiens à une altitude moindre que celle des sources perchées au contact du conglomérat principal.

Les sapeurs-mineurs français relevèrent la succession lithologique suivante, depuis le col de La Chapelotte, lors du creusement des systèmes de rameaux de mine. Il s'agit d'un rare relevé historique des successions géologiques rencontrées et décrites par les sapeurs durant la Grande Guerre:[2066]

- *Sur 2 à 3 m de profondeur : terre végétale et grès chaotique,*
- *De 3 à 11 m : grès tendre et humide,*
- *De 11 à 13 m : couche aquifère, sable gréseux mélangé à de la marne,*
- *De 13 à 22 m : grès dur et sec,*
- *De 22 à 60 m : poudingue de grès et de quartz,*
- *Au-dessous de 60 m : grès franc.*

Ce relevé montre la présence au sein du Grès vosgien d'une nappe perchée. Si on considère l'altitude + 446 m NGF pour le col, ce niveau d'eau s'établirait aux environs de + 433 m NGF. L'essentiel des sources échantillonnées s'établissent vers cette altitude à l'exception des sources du champ captant d'Allencombe situées bien plus bas vers + 350 m NGF. Les bassins versants alimentant les sources d'Allencombe n'est pas connu. Du point de vue physico-chimique, les eaux sont faiblement minéralisées et la dureté est très basse, 2 à 6°F.

Faits et évènements historiques notoires

En août 1914, les troupes allemandes se replièrent sur les hauteurs de La Chapelotte (désignée par Côte 542 chez les Français), un col reliant la plaine de Lorraine à l'ouest et le massif montagneux. Le col de La Chapelotte était considéré par les troupes de Guillaume II, stationnées à l'est, comme le dernier verrou montagneux à contrôler avant de pouvoir dévaler sur la Lorraine. Après la guerre de mouvement d'août et septembre 1914, la région de La Chapelotte connut un certain calme, troublé cependant par les attaques allemandes sur la Renière, au nord de Celles-sur-Plaines, du 6 octobre et du 5 novembre 1914 et les contre-attaques françaises du 24 octobre et du 15 novembre 1914.

De violent combats opposèrent Allemands et Français autour du col de La Chapelotte le 27 février 1915. Les Allemands attaquèrent les positions des Chasseurs Alpins au col et s'emparèrent des Haut-des-Planches (Côte 587) et des Haut-des-Roches (Côte 576), à moins de 800 m du col. Seuls le piton des Collins et le col de La Chapelotte restèrent entre les mains des troupes françaises au terme de cette attaque. Dans des conditions climatiques éprouvantes, les troupes françaises (dont des Niçois, des Corses) attaquèrent sans relâche jusqu'au 3 mars des positions que les Allemands fortifièrent rapidement de mitrailleuses. Les lignes françaises étaient situées sous les lignes allemandes, en contre-bas, et parfois éloignées de 20 mètres seulement. Jusqu'au 15 mars, toutes les contre-attaques françaises échouèrent, avant que le général Dubail (à la tête de la Ier Armée) ne fit cesser ces inutiles tentatives. La faiblesse des effectifs, les pertes et la solidité des installations allemandes conduisirent alors à une stabilisation du front et à l'immobilisme de la guerre de position. Les Allemands s'installèrent solidement et pour longtemps de façon défensive sur ces positions. La Cote 542, au nord de La Chapelotte, ne connaîtra *in fine* jamais le calme. Les bombardements d'artillerie obligèrent à de fastidieux travaux de réparation des tranchées. A partir de mi-1916, les effectifs connurent un important *turn-over*, avec parfois de très brefs séjours. Alors, comme dans d'autres secteurs vallonnés du front de la Grande Guerre où la géologie était favorable, les militaires misèrent sur une vieille tactique obsidionale pour créer une brèche décisive dans les défenses adverses, et y faire déferler son infanterie : c'est la guerre de mines.

[2066] Bibliothèque nationale de France. *Revue du génie militaire.* 1929/07-1929/12.

A La Chapelotte, une longue guerre de mines fut inaugurée en juin 1915 par les Allemands. La première mine creva le sol de la Côte 542 le 8 juin 1915. Les Français contre-attaquèrent par une série d'explosions le 15 juillet, les 16 et 21 août puis les 4, 6, 7 et 29 septembre détruisant par-là les travaux souterrains de l'ennemi. Les Allemands répondirent par des camouflets, sans effets majeurs. Puis les Allemands désirant être à l'initiative des attaques, étendirent leur réseau chtonien en investissant la profondeur, à 25 mètres sous le système des français qui continuèrent à creuser et réussirent finalement, à miner des fourneaux et à les faire fonctionner en janvier, février, mars et avril 1916. En réponse deux mines allemandes explosèrent, mais, qui là aussi étant trop éloignées des travaux français, restèrent sans effets.

Les Allemands se sentant désemparés et dépassés sous terre décidèrent de prendre la Cote 542 par la surface en avril 1917. Une intense préparation d'artillerie, impliquant des bombes de tranchées, des projectiles de 150 et 210 mm fut déclenchée le 27 avril. Les Français reculèrent et laissèrent les Allemands prendre la Cote 542 pour y être délogés plus tard par une contre-attaque. Mais la zone des combats s'étendit encore au secteur des Collins. Les mitrailleuses françaises, soutenues par l'Artillerie fauchèrent les fantassins allemands qui ne pouvaient s'abriter, les entrées des mines et abris ayant été judicieusement murés par les sapeurs-mineurs. Pendant ce temps, les creusements opérés par les mineurs étaient déjà si profonds que ces hommes n'entendaient plus les détonations martelant la surface. Mais les travaux durent s'arrêter car certaines installations de surface étaient endommagées (canalisation d'air comprimé, la voie ferrée d'évacuation des gravats et les conducteurs électriques).

Les Français captèrent le bruit de creusements allemands profonds. Mais, dans ce jeu du chat et de la souris sous terre, afin d'anticiper cette nouvelle attaque par la mine, les Français établirent un nouveau chantier, encore plus profond, vers 35 m. L'ancien système de mine était toujours utilisé en parallèle. Cinq explosions françaises et cinq explosions allemandes s'y succédèrent jusqu'en aout 1916. Les deux systèmes arrivèrent au contact en septembre 1916. Les Français firent exploser deux camouflets en septembre et octobre 1916, de trois tonnes chacun. A ces profondeurs, malgré l'importance de la charge, aucun effet n'était visible en surface ; par contre, les terrains furent complètement bouleversés en profondeur. L'ennemi riposta en octobre et novembre par des explosions doubles. « *On vide la querelle à 35 m par un échange d'explosions les 27, 28 et 29 novembre, puis l'effort se déporte dans le nouveau système qui va être descendu à 45 et 50 mètres*[2067] ». Les Français intensifièrent le nombre des explosions et les charges en décembre 1916, janvier et mars 1917. Le fourneau du 3 décembre 1916 était formé de 12 tonnes d'explosif. Ces attaques causèrent de lourdes pertes chez l'adversaire qui répliqua en avril 1917 par une très forte explosion. « *Dans cet étage de galeries la question est désormais liquidée, le terrain est trop bouleversé et trop imprégné de gaz toxiques pour essayer de passer* [2068]». La mine fut descendue à 75 mètres. En août 1917, les systèmes se rencontrèrent à nouveau et les Français firent jouer deux fourneaux de 17 tonnes d'explosif. Fin août une seconde charge de 14 tonnes explosa. « *En un point reconnu favorable on crée une coupure dans le cheminement avec une petite charge de dynamite, puis en arrière de cette coupure on charge un camouflet de 3 tonnes, c'est tout ce qui reste dans la poudrière après la consommation des jours précédents et l'on n'a pas le temps d'attendre des apports de l'arrière. L'amorçage est préparé et un microphone est laissé dans la charge, de cette manière on entendra le boche et à la moindre velléité de reprise de travail le camouflet lui partira dans les jambes. Ce fut la fin de la Guerre des Mines. Jamais le Boche, sentant la menace qui le guettait, ne s'est avisé de revenir dans ses cheminements*[2069] ».

[2067] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 1 KT25. Guerre de mines de La Chapelotte. Par le Capitaine Grandidier.

[2068] *Ibid.*

[2069] *Ibid.*

Les Français avaient déjà par ailleurs entrepris le creusement d'un nouveau système à 110 mètres de profondeur, qui partait du Col et se dirigeait sur 300 mètres vers Allencombe. La Cote 542 resta française. La guerre de mines fut stoppée en septembre 1917. Au final, la guerre de mines s'organisa à La Chapelotte via un réseau de galeries organisé en six étages :

- Etage n°1, de 5 à 10 m;
- Etage n°2, de 20 à 25 m;
- Etage n°3, de 30 à 35 m;
- Etage n°4 de 40 à 50 m;
- Etage n°5 de 70 à 74 m;
- Etage n°6 à 120 m (galerie Chevrot).

Ces profondeurs sont celles des têtes d'attaque, prises par rapport au plan horizontal passant par la Côte 542 (pointe du saillant). Le point repère à partir duquel ces profondeurs furent définies reste imprécis.

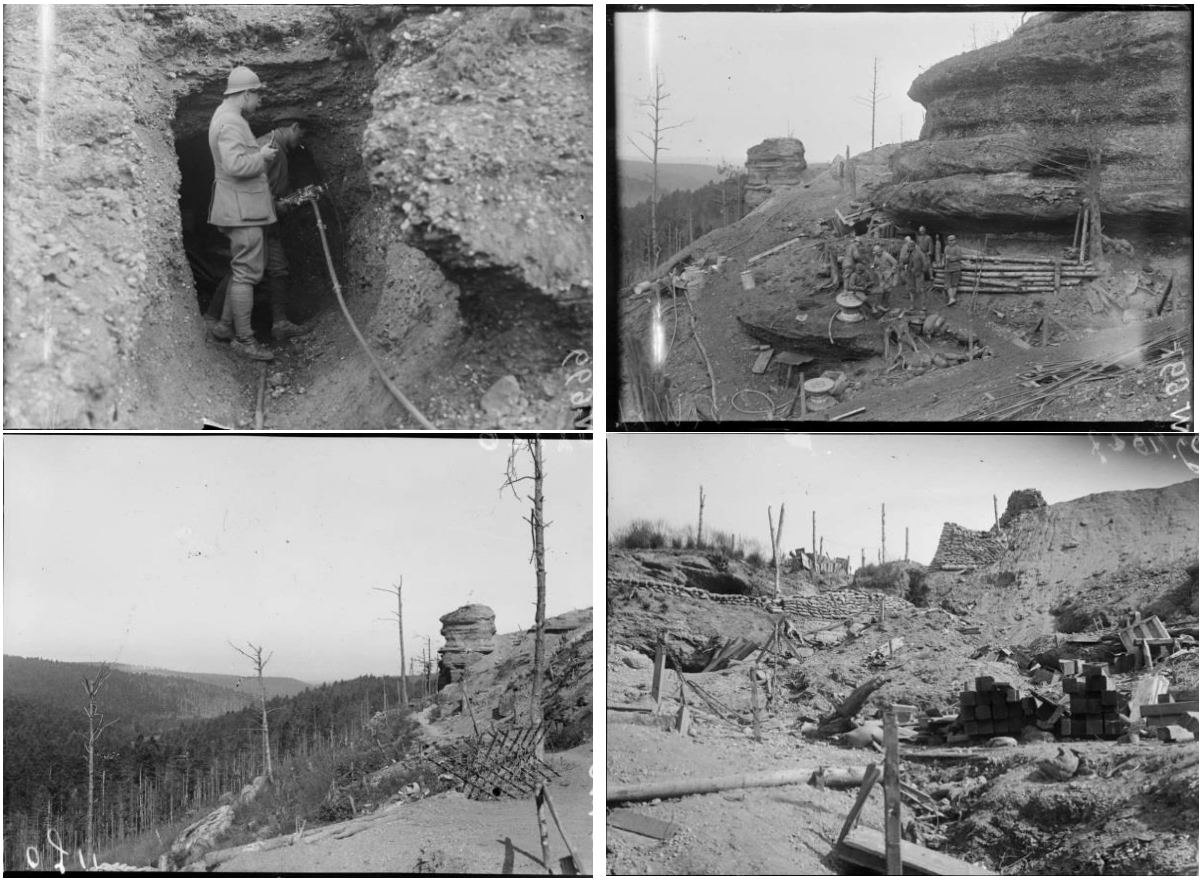


Figure 415 : La Chapelotte, au nord de Celles-sur-Plaine. Creusement au perforateur pneumatique dans le Poudingue et aperçu photographique des positions françaises[2070].

[2070] La Contemporaine, L'Argonnaute. Fond Valois. En haut à gauche : perforatrice en action, creusement d'une sape dans le rocher, 12/03/1917, référence VAL 157/096 / En haut à droite : cagnas aménagées dans les rochers, 12/03/1917, référence VAL 157/078 / En bas à gauche : organisations défensives, 17/09/1917, référence VAL 157/080 / En bas à droite : organisations défensives sur le sommet,17/09/1917, référence VAL 157/083

Figure 416 :La Chapelotte ; aperçus photographiques des souterrains creusés dans le Grés vosgien[2071].

En définitive, Français et Allemands firent jouer 55 fourneaux et camouflets sur un front de 150 m. Les camouflets les plus importants furent constitués de 10 et 12 tonnes de dynamite. Les mineurs de La Chapelotte creusèrent dans le Grés vosgien 1 500 m de cheminements de diverses sections et 120 m de puits. Ils mirent en œuvre environ 150 tonnes d'explosifs dont un quart de *Cheddite* et le reste de dynamite gomme. La plus puissante charge française fut constituée de 81 tonnes d'explosifs.

Avec 120 mètres, c'est à La Chapelotte que la plus grande profondeur a été atteinte dans la guerre de mines sur l'ensemble des fronts de la Grande Guerre. Les terrains indurés furent totalement bouleversés et fracturés. A La Chapelotte, prenait le dessus non pas, comme sur le restant du front, celui qui parvenait à creuser en toute discrétion et miner par surprise avec des charges puissantes, mais celui qui creusait (inévitablement bruyamment (avec des perforateurs)) et minait le plus rapidement dans le Grès vosgien (cf. Figure 416). Aucune archive ne fut identifiée relatant des activités de désobusage et de destruction de Restes Explosifs de Guerre dans le secteur de La Chapelotte. La consultation de photographies aériennes anciennes sur le secteur n'a pas mis en évidence de traces de destruction de REG (entonnoirs d'éclatement). Les photographies aériennes datant de l'entre-deux-guerres sont rares (missions de 1935) et de mauvaise résolution.

Echantillonnage et analyses réalisés

Une démarche similaire à celle appliquée au secteur du Linge fut entreprise dans celui de La Chapelotte. Sur les 32 sources repérées par les reconnaissances préliminaires de terrain, 17 furent échantillonnées en octobre 2017 pour l'analyse des ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium. Ces eaux furent prélevées et filtrées à 0,45 µm pour être ensuite conditionnées dans des flacons de 100 mL en PE puis analysées au laboratoire du BRGM selon des protocoles analytiques décrits dans ce qui précède.

Au regard des résultats de la première phase, un échantillonnage sur un lot restreint de cinq d'échantillons fut réalisé dans un second temps. Le programme analytique de la première campagne de 2017 fut complété par l'analyse des métaux (Cd, Cr, Hg, Pb, Zn) et métalloïdes (As, Se), des cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) et anions majeurs (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-), certains éléments traces (Li, B, Br, iodure) (sur des eaux filtrées à 0,45 µm). Ces ions et éléments furent analysés au laboratoire du BRGM selon des protocoles analytiques décrits dans ce qui précède.

[2071] http://souterrains.vestiges.free.fr/spip.php?Article51 Weiss, J.F. (2009). *Un extraordinaire épisode de la guerre souterraine dans les Vosges.*

Les NAC et leurs sous-produits de transformation environnemental furent aussi recherchés sur les eaux brutes (échantillons de 2 x 1 L en verre brun) par le laboratoire Envilytix GmbH (avec une limite de quantification (LQ) de 0,1 µg.L^{-1}). Ces cinq échantillons ont été collectés à cet effet en juin 2018. Puis les eaux du champ captant furent intégrées en 2020 au programme d'échantillonnage et d'analyse du LHN de l'ANSES (comprenant une campagne et d'analyse systématique, une analyse de contrôle) puis à celui de la campagne régionale du PRSE3 qui, via deux techniques analytiques différentes, purent rabaisser significativement les LQ. Les résultats analytiques sont rassemblés dans les tableaux places en Annexe I du présent manuscript. Le detail des informations relatives à l'échantillonnage, aux protocoles analytiques appliqués, au contexte environnemental peut être consulté dans Hubé D. (2019)[2072].

Résultats

- **Occurrences d'ions chlorate et perchlorate**

On constate que l'impact perchloraté en octobre 2017 était très localisé dans le secteur d'étude de La Chapelotte comme au Lingekopf (cf. Figure 418 et Figure 419). Les anomalies se concentrent au droit et aux abords du hameau d'Allencombe (commune de Badonviller), à 1,5 km au nord-ouest du col de La Chapelotte, à une altitude d'environ 100 m en dessous de celle du col. Il s'agit de sources captées pour l'alimentation en eau potable de villages d'Angomont et de Bréménil qui présentent la particularité d'être parmi les sources du secteur d'étude situées aux altitudes les plus basses, à une altitude bien inférieure à celle des zones de combat du secteur (cf. Figure 417).

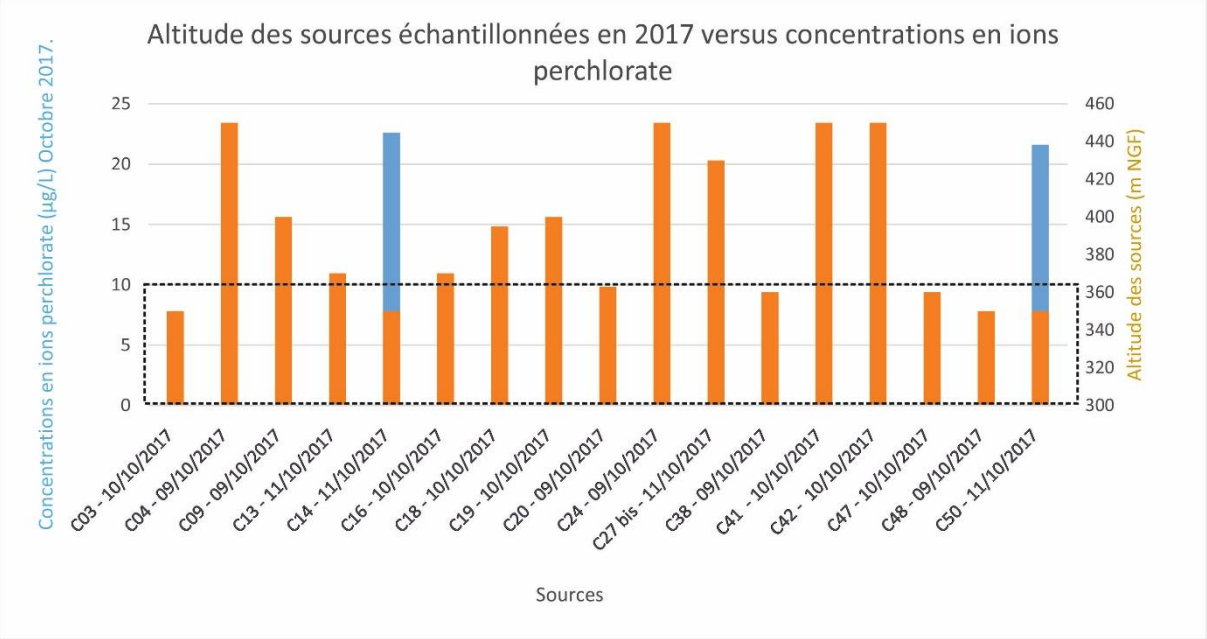


Figure 417 : Altitudes des sources échantillonnées et concentrations en ions perchlorate mesurées en 2017 à La Chapelotte

[2072] Hubé D. (2019). *Recherche de l'origine de l'empreinte perchloratée des eaux du Massif des Vosges. Etudes sectorielles (54,68), op. cit.*

Les ions perchlorate n'ont été en effet détectés en 2017 qu'en deux points, dans les eaux des sources C14 (source n°4, d'indice BSS000UTJZ027 / 06X0046/HY) et C50 (source n°5 d'indice BSS000UTKB / 02706X0048/HY) du champ captant du hameau d'Allencombe, avec respectivement 22,6 µgClO_4^-.L^{-1} et 21, µgClO_4^-.L^{-1} (cf. Figure 420).

Ces deux sources sont proches de quelques dizaines de mètres et appartiennent au champ captant au niveau duquel l'occurrence de ces ions avait déjà été mise en évidence par les mesures de l'ARS de 2014 et 2015 (avec des concentrations maximales mesurées de 35,8 µgClO_4^-.L^{-1}). Ces concentrations apparaissent stables d'une campagne à l'autre. Les concentrations mesurées en juin 2018 (seconde campagne de prélèvement) diffèrent peu de celles d'octobre 2017 (avec respectivement 27,3 µgClO_4^-.L^{-1} et 19,3 µgClO_4^-.L^{-1}). A l'exception de traces locales d'ions chlorate (source n°2), aucune anomalie hydrochimique autre que l'occurrence d'ions perchlorate n'a été constatée à l'échelle du secteur d'étude pour les composés inorganiques. Les concentrations en ions nitrate sont faibles, inférieures à 5 mg.L^{-1} (avec une concentration maximale mesurée de 11 mg.L^{-1} (octobre 2017) à la source C42, toujours à proximité d'Allencombe (au nord du hameau).

- **Occurrence de composés nitroaromatiques**

Les composés traceurs des poudres et explosifs et leurs sous-produits de transformation n'ont pas été détectés à des concentrations supérieures à la limite de quantification appliquée (0,1 µg.L^{-1}) en 2017 (analyses du laboratoire Envilytix GmbH). Les prélèvements furent poursuivit en 2020 par l'ANSES avec des moyens analytiques permettant de quantifier des substances en dessous de 100 ng.L^{-1}. Elles démontrèrent que les eaux du champ captant d'Allencombe sont clairement marquées par les isomères du dinitrotoluène (et en particulier des 2,6-DNT et 3,4-DNT), avec des traces d'isomères mono-nitrés (mononitrotoluène). La somme des composés nitroaromatiques ∑NAC avoisine (maximum mesuré) 240 ng.L^{-1} (cf. Figure 420).

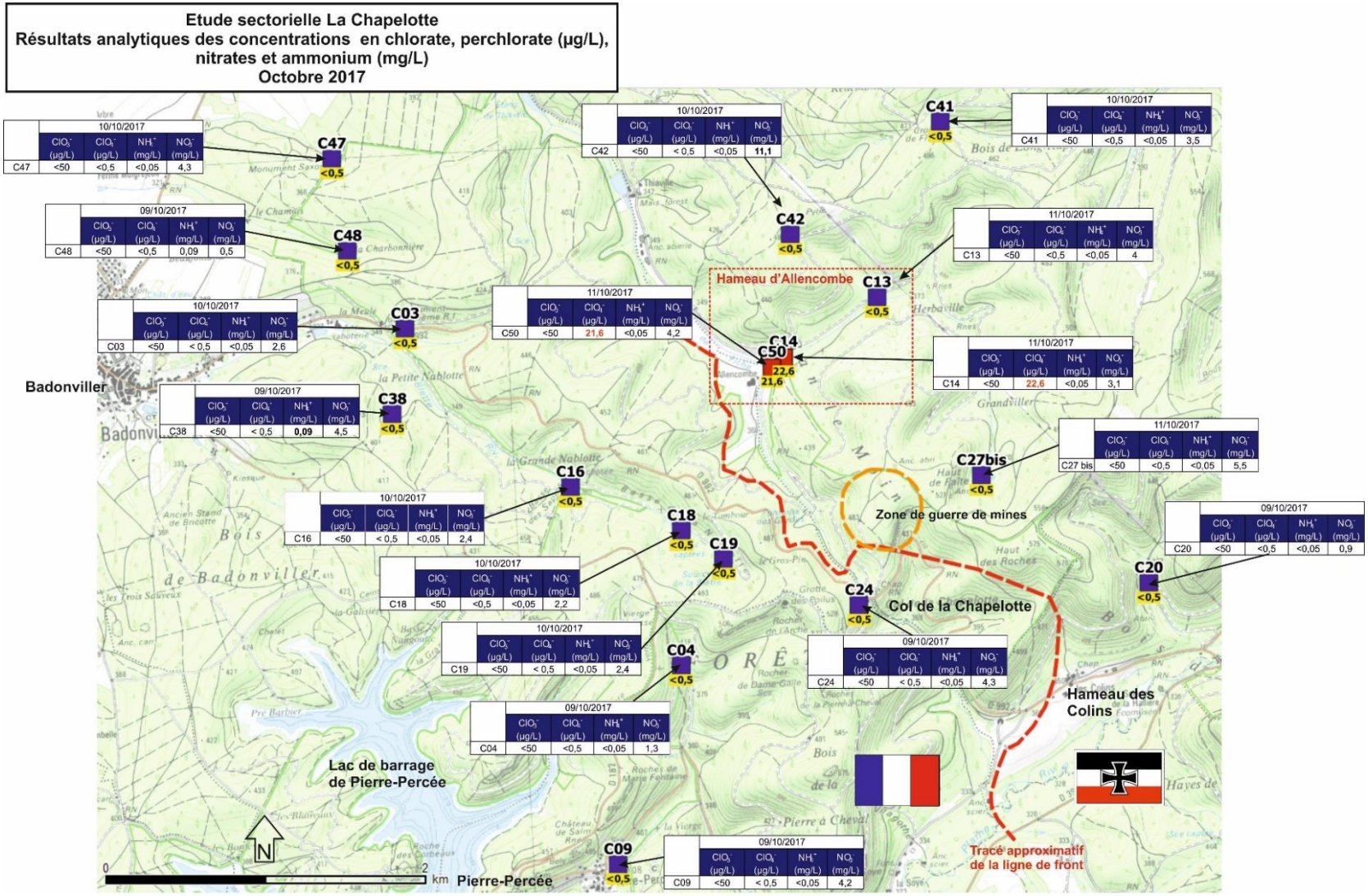
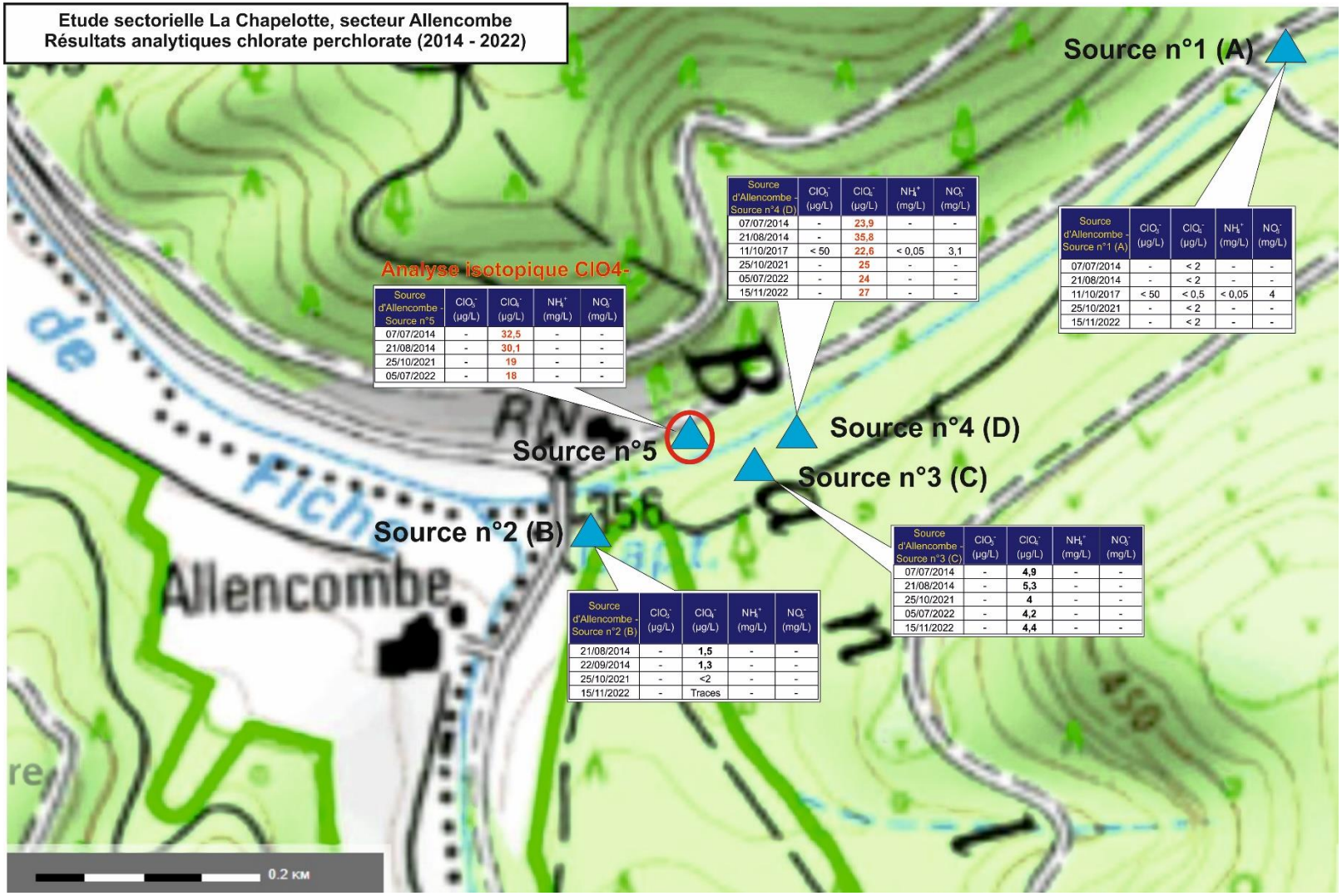


Figure 418 : Concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources du secteur de La Chapelotte (octobre 2017)



Source d'Allencombe - Source n°5	ClO_3^- (µg/L)	ClO_4^- (µg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
07/07/2014	-	32,5	-	-
21/08/2014	-	30,1	-	-
25/10/2021	-	19	-	-
05/07/2022	-	18	-	-

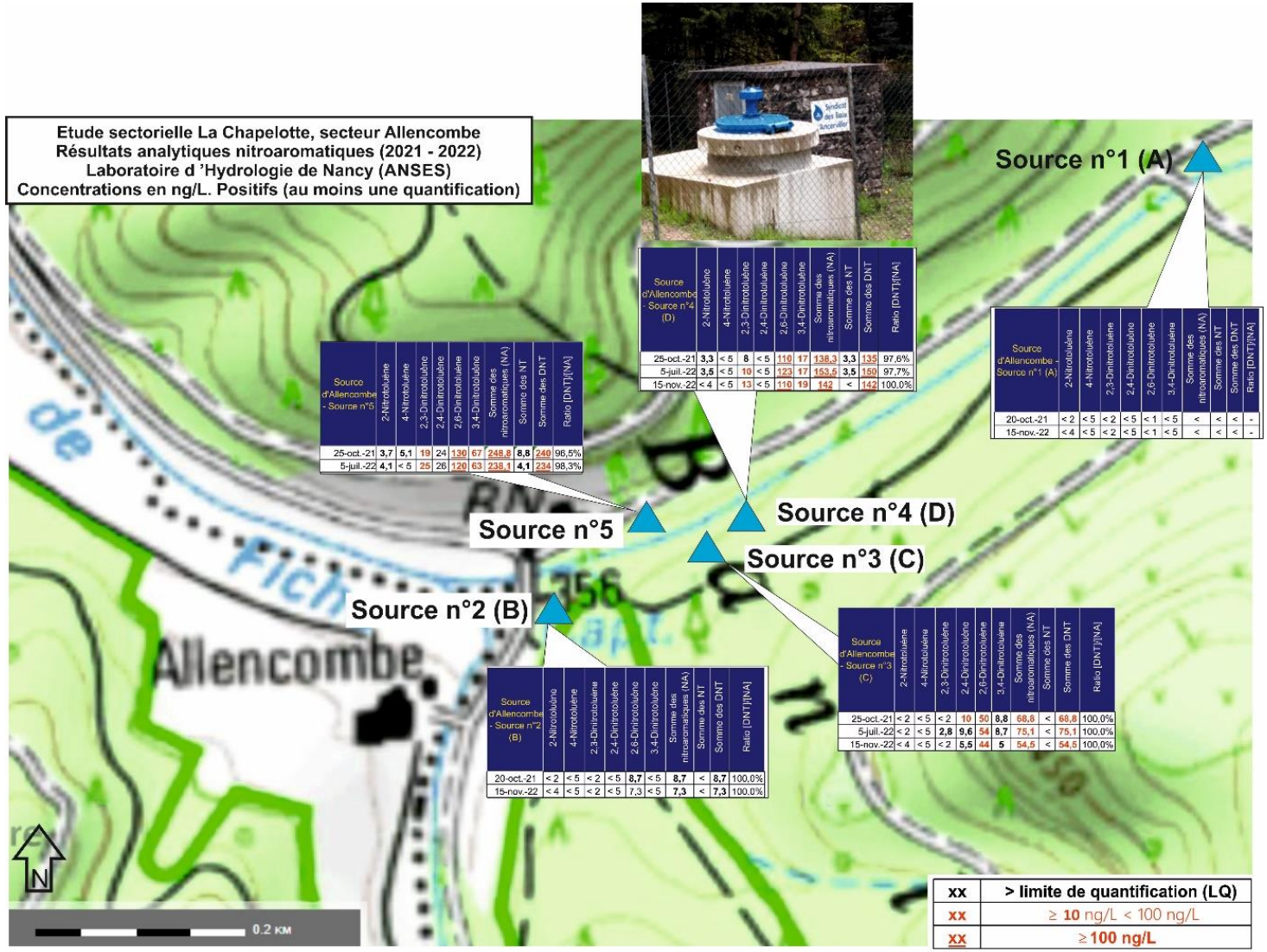
Source d'Allencombe - Source n°4 (D)	ClO_3^- (µg/L)	ClO_4^- (µg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
07/07/2014	-	23,9	-	-
21/08/2014	-	35,8		
11/10/2017	< 50	22,6	< 0,05	3,1
25/10/2021	-	25	-	-
05/07/2022	-	24	-	-
15/11/2022	-	27	-	-

Source d'Allencombe - Source n°1 (A)	ClO_3^- (µg/L)	ClO_4^- (µg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
07/07/2014	-	< 2	-	-
21/08/2014	-	< 2	-	-
11/10/2017	< 50	< 0,5	< 0,05	4
25/10/2021	-	< 2	-	-
15/11/2022	-	< 2	-	-

Source d'Allencombe - Source n°3 (C)	ClO_3^- (µg/L)	ClO_4^- (µg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
07/07/2014	-	**4,9**	-	-
21/08/2014	-	**5,3**	-	-
25/10/2021	-	**4**	-	-
05/07/2022	-	**4,2**	-	-
15/11/2022	-	**4,4**	-	-

Source d'Allencombe - Source n°2 (B)	ClO_3^- (µg/L)	ClO_4^- (µg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
21/08/2014	-	**1,5**	-	-
22/09/2014	-	**1,3**	-	-
25/10/2021	-	<2	-	-
15/11/2022	-	Traces	-	-

Figure 419 : Compilation des résultats analytiques pour les concentrations en ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium des sources captées du hameau d'Allencombe, commune de Badonviller, secteur de La Chapelotte (2014-2022).



Source d'Allencombe - Source n°5	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [DNT]/[NA]
25-oct.-21	3,7	5,1	19	24	130	67	248,8	8,8	240	96,5%
5-juil.-22	4,1	< 5	25	26	120	63	238,1	4,1	234	98,3%

Source d'Allencombe - Source n°4 (D)	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [DNT]/[NA]
25-oct.-21	3,3	< 5	8	< 5	110	17	138,3	3,3	135	97,6%
5-juil.-22	3,5	< 5	10	< 5	123	17	153,5	3,5	150	97,7%
15-nov.-22	< 4	< 5	13	< 5	110	19	142	<	142	100.0%

Source d'Allencombe - Source n°1 (A)	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [DNT]/[NA]
20-oct.-21	< 2	< 5	< 2	< 5	< 1	< 5	<	<	<	-
15-nov.-22	< 4	< 5	< 2	< 5	< 1	< 5	<	<	<	-

Source d'Allencombe - Source n°2 (B)	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [DNT]/[NA]
20-oct.-21	< 2	< 5	< 2	< 5	8,7	< 5	8,7	<	8,7	100,0%
15-nov.-22	< 4	< 5	< 2	< 5	7,3	< 5	7,3	<	7,3	100.0%

Source d'Allencombe - Source n°3 (C)	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [DNT]/[NA]
25-oct.-21	< 2	< 5	< 2	10	50	8,8	68,8	<	68,8	100.0%
5-juil.-22	< 2	< 5	2,8	9,6	54	8,7	75,1	<	75,1	100.0%
15-nov.-22	< 4	< 5	< 2	5,5	44	5	54,5	<	54,5	100,0%

Figure 420 : Compilation des résultats analytiques pour les concentrations en composés nitroaromatiques (avec au moins un positif) pour les sources AEP d'Allencombe, secteur de La Chapelotte (2021-2022).

3.4. ETUDE SECTORIELLE DE LA REGION DE SUIPPES

3.4.1 Cadre géographique et contexte hydrogéologique

Le secteur d'étude est vaste et couvre une superficie d'environ 300 km^2. Centré sur le grand camp militaire actif de Suippes (d'environ 14 x 12 km), il est bordé au sud par la rivière Suippes, au nord par les limites départementales entre la Marne (au sud) et les Ardennes (au nord), à l'est par les premiers reliefs de l'Argonne et la vallée de l'Aisne et à l'est par la rivière Py (cf. Figure 422 et Figure 426).

Les captages AEP (puits) réputées perchloratés et pour lesquels la campagne nationale de recherche des résidus d'explosifs de 2020 de l'ANSES a mis en évidence l'occurrence de concentrations significatives en NAC, sont ceux de Souain Perthes-les-Hurlus en bordure est du camp militaire de Suippes (cf. Figure 426) et de Dontrien, dans la vallée de la Suippes, à 11 km au nord-ouest de Souain (hors champ de la carte de la Figure 426). A noter que le captage de Dontrien est situé à 4 km à l'est du camp militaire et centre d'expérimentation du CEA de Moronvilliers. Les secteurs aux EDCH perchloratés coïncident dans la Marne et les Ardennes, peu ou prou avec les anciennes lignes de front de 1914-1918 (cf. Figure 422).

La géologie du secteur est assez monotone, très largement dominée par les formations crayeuses du Crétacé supérieur (différentes craies blanches du Sénonien de Champagne), localement transformées suite à leur fracturation à l'Oligocène (Craies fracturées et indurées), surmontées de formations superficielles quaternaires de couverture (Grèzes ou « graveluches » crayeuses périglaciaires sur les versants, plus au moins limono-argileuses, parfois mêlées d'alluvions) et d'alluvions en fond de vallées (sables crayeux à granules ou galets crayeux et calcaires). La partie sommitale de la Craie est généralement altérée et fissurée et est aquifère.

Les écoulements de la nappe de la Craie, captée par les EDCH impactés par les ions perchlorate, sont réglés par la topographie. Les points hauts de Moronvilliers, Suippes, Massiges, constituent des zones de divergences des écoulements orientés vers les fonds de vallées dont les cours d'eau drainent la nappe. Le captage de Souain est un puits vertical de 27 m de profondeur captant la Craie à *Micraster* (Craie de Châlons) attribuée au Santonien. Le captage de Souain intercepte donc des eaux de la nappe de la Craie provenant de l'est et du nord-est. Le puits de Dontrien, alimentant par intermittence le réservoir échantillonné, est un puits de 25 m qui capte des sables puis la craie fissurée.

La rivière Dormoise trouve sa source au sein du camp militaire de Suippes et s'écoule ensuite vers l'est. Cette rivière a été retenue pour la réalisation d'analyses isotopiques. En effet, des analyses sur ses eaux au niveau du lavoir de Rouvroy Ripont effectuées dans le cadre de cette recherche en 2016, 2017 et 2018, montrent la présence récurrente de concentrations élevées en ions perchlorates (> 20 µgClO_4^-.L^{-1}, avec une concentration maximale de 33 µgClO_4^-.L^{-1}). Il est à regretter qu'aucun jaugeage (estimation du débit de la rivière au niveau du point de prélèvement) n'ait été effectué qui aurait permis d'estimer les flux massiques journaliers en perchlorate véhiculés par les eaux de la rivière (en g ou kgClO_4^-.jour^{-1}). Ce débit est visuellement assez important, de quelques L.s^{-1} (soit pour des débits de 1 et 5 L.s^{-1}, et 20 µgClO_4^-.L^{-1} et 33 µgClO_4^-.L^{-1}, des flux massiques de 1,7 gClO_4^-.jour^{-1} et 14,2 gClO_4^-.jour^{-1}).

Les sources de la Dormoise se situent à proximité immédiate d'un centre de destruction de munitions, celui de Ripont, renseigné dans les archives. Il est possible que les destructions filmées par l'Armée française fin 1918 l'aient été à Ripont et que les entonnoirs ouverts par ces explosions massives aient généré les sources actuelles en pulvérisant les terrains de la zone non saturée[2073].

Ce secteur est marnais est essentiellement agricole (plaine agro-industrielle de la Champagne crayeuse) et une zone de culture traditionnelle de la betterave sucrière, du maïs et du blé. Il est aussi marqué par la présence du vaste terrain militaire actif d'exercice et de manœuvre de Suippes.

3.4.2 Un historique complexe

Ce secteur est localisé dans un environnement totalement différent de ceux des Vosges et de l'Argonne et complète judicieusement les études sectorielles réalisées et décrites dans ce qui précède. Il s'agit d'un secteur correspondant au front ouest-est des batailles de Champagne, entre à l'ouest Reims et Moronvilliers et à l'est l'Argonne et la Main de Massiges. Ce secteur fut un champ de bataille très actif dès 1915 et jusqu'à la fin de la guerre. Théâtre des opérations de la première bataille de Champagne, ce front fut sans cesse réactivé durant la Première Guerre mondiale.

Débutée le 14 décembre 1914 et s'achevant le 17 mars 1915, la bataille de Champagne (par rétronymie première bataille de Champagne) fut la première offensive majeure après l'épisode de la course à la mer. Les combats se concentrèrent sur certains secteurs particuliers comme Perthes-lès-Hurlus, Massiges, le bois Sabot, Mesnil-lès-Hurlus et la ferme de Beauséjour. Menés dans des conditions climatiques épouvantables, ils furent temporairement suspendus en janvier 1915. Les résultats de cette bataille furent peu concluants. Les Français maintinrent leurs positions et les Allemands à distance d'un assaut.

Cette bataille fut aussi la première démonstration opérationnelle de l'intérêt de l'usage intensif des moyens de l'Artillerie. Les forces en présence usèrent alors de la guerre de mines dans la guerre de position pour défaire les positions adverses (cf. Figure 421). Le 23 mars 1915 dans le secteur vers la ferme des Wacques et Auberive-sur-Suippes, puis le 23 juillet 1915, les Allemands firent fonctionner trois puissantes charges avec trois violentes explosions au nord de Perthes-les-Hurlus.

Figure 421 : Entonnoir de mine ouvert dans la Craie blanche. Cote 200, Perthes-lès-Hurlus. Avril 1916[2074].

[2073] Fonds Historique / CNRS Images. Numéro de notice : 4265. Déminage à Tahure : première explosion. Direction des Inventions, des études et des expériences techniques. Section de cinématographie technique de la direction des inventions. 1918.

[2074] La Contemporaine. L'Argonnaute, Fond Valois, référence VAL 117/089, date avril 1916. Cote 200 (ouest de Perthes-lès-Hurlus). Un entonnoir de mine. Le fond de l'entonnoir.

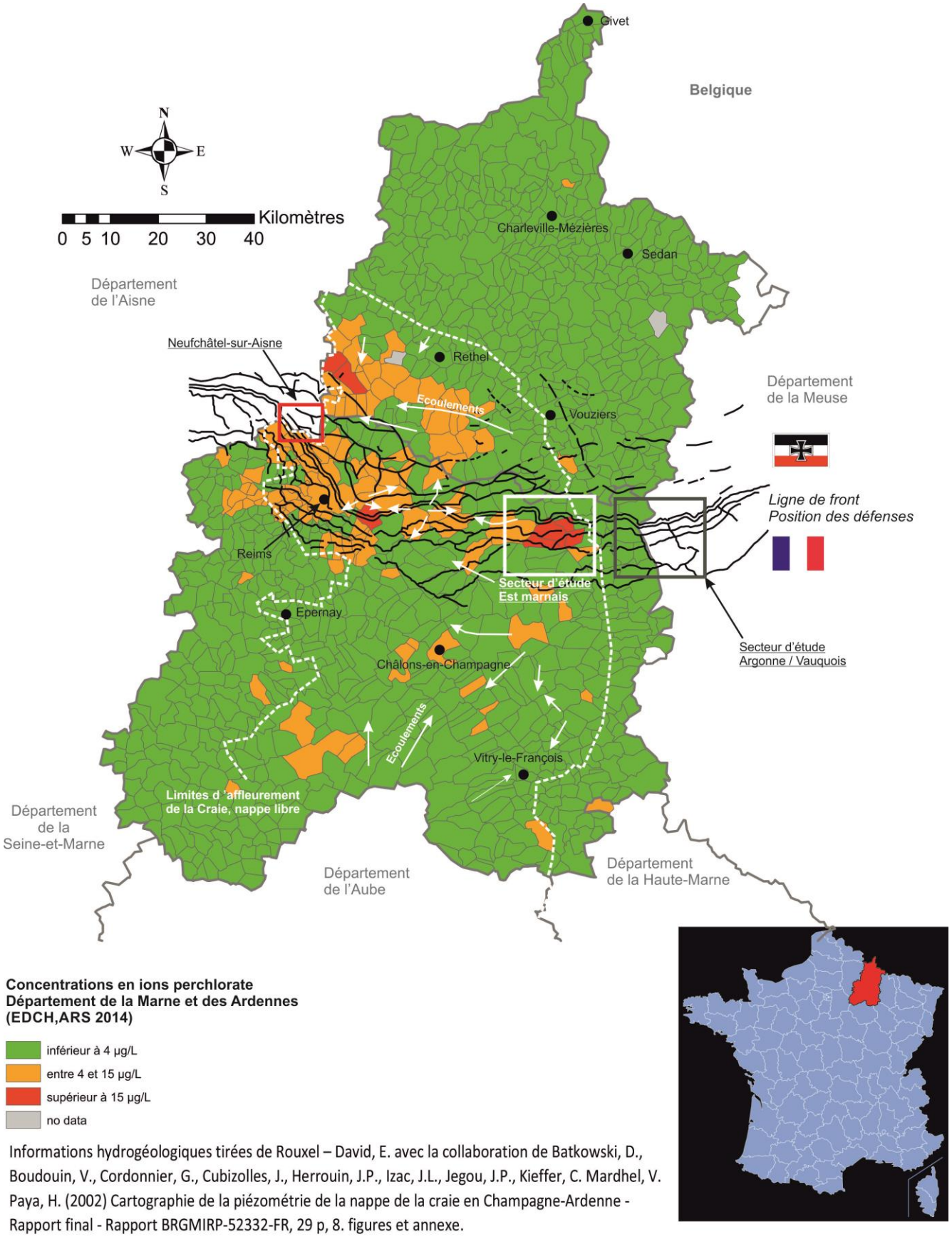


Figure 422 : Localisation du secteur d'étude de l'est marnais et distributions des concentrations en ions perchlorate des EDCH des départements de la Marne et des Ardennes (2014). Habillage par des éléments de contexte historique et hydrogéologique.

La seconde bataille de Champagne, du 25 septembre 1915 au 9 octobre 1915, fut à l'initiative des Français. Joffre voulait convaincre certains neutres de s'engager au côté des Alliés, mais sur le plan stratégique il s'agissait surtout (i) de fixer les troupes allemandes en Champagne pour soulager le front oriental et ainsi aider les offensives russes et (ii) rompre le front pour impérativement retrouver la guerre de mouvement. Le 22 septembre 1915 commença une préparation d'artillerie qui dura trois jours avec plus de 15 000 obus tirés. Il s'agissait des premiers bombardements massifs de préparation par l'Artillerie sur le front occidental de la Grande Guerre. 1 100 pièces d'artillerie au total furent déployées. L'offensive engagée le 25 septembre 1915, eut un succès limité par manque de coordination interarmes au sein de l'armée française. Le front progressa de 3 à 4 km vers le nord au prix de 27 800 tués côté français (et bien moins côté allemand) et 1 200 000 obus consommés mais la rupture escomptée ne fut pas réalisée.

Puis après la guerre, une zone comprenant des villages détruits (Tahure, Perthes, Ripont, etc.) fut classée *zone rouge*, rachetée par l'Etat pour en faire l'un des plus grands camps militaires français (actuel terrain d'exercice militaire du Centre d'Entraînement Interarmes et du Soutien Logistique (Cential)). Un centre de destruction de munitions de 1914-1918 fut installé vers Ripont, non loin de la source de la Dormoise, dans la partie orientale de l'actuelle emprise militaire. Des destructions de munitions furent opérées depuis la Grande Guerre jusqu'à nos jours sur ce camp, notamment par *Open Detonation*. Le secteur d'études est bordé (i) à l'ouest par un autre camp militaire, celui de Moronvilliers, au sein duquel se situe un centre d'expérimentation du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ayant pratiqué historiquement des essais de détonation avec des explosifs (pour les implosions des bombes nucléaires), (ii) à l'est par la Main de Massiges, un point haut où eurent lieu de violents combats avec aussi le recours à la tactique de la guerre de mines.

Le secteur s'avère donc complexe car mêle des sources potentielles en ions perchlorate de diverses origines (agricoles, militaires) et autres résidus d'explosifs correspondant à différentes périodes de combats de 1914-1918 puis d'activités de destruction de munitions étalées de 1918 à nos jours, qu'il s'agisse d'engins de 1914-1918 ou de projectiles plus récents.

3.4.3 Echantillonnage réalisé

Les eaux des captages AEP de Souin Perthes-les-Hurlus et de Dontrien ont été échantillonnées pour l'analyse au laboratoire (BRGM) des ions chlorure, chlorate, perchlorate et sulfate dans les eaux brutes et des eaux traitées en juillet 2023. L'Eau de Javel utilisée pour la chloration des eaux brutes avant distribution a aussi été analysée pour ces paramètres dans le but d'évaluer l'influence de la chloration sur les concentrations en ions chlorate et perchlorate des eaux traitées et distribuées.

Les eaux des rivières Dormoise (lavoir de Rouvroy Ripont) et du Marson (au Pont de Marson) ont aussi été échantillonnées pour la recherche des ions chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium à respectivement huit et six reprises entre 2016 et 2023. Les cations et anions majeurs ont été recherchés sur les eaux de ces deux rivières en 2017 (laboratoire du BRGM). Les eaux du ruisseau de l'étang de Massiges, la rivière Suippes au pont de Somme-Suippes, la source de la Py à Somme Py Tahure et le ruisseau du Vivier à Manre ont aussi été échantillonnées en septembre 2016. Ces eaux ont été filtrées à 0,45 µm et conditionnées dans des flacons de 100 mL en PE.

Les NAC ont été analysés par le LHN sur les eaux brutes et traitées des captages de Suippes, de Souain et de Dontrien à la faveur de la campagne nationale ANSES de 2021-2022 (avec un échantillonnage de contrôle à Souain et Dontrien).

Ces composés ont été recherchés dans les eaux brutes du captage de Dontrien, dans les eaux de la Dormoise et du Marson en juin 2023 dans le cadre de la présente recherche. Les échantillons d'eau brute ont été conditionnés dans des flacons de 2 x 1 L de verre brun.

La liste des paramètres et les protocoles analytiques appliqués par le LHN sont ceux décrits dans ce qui précède. On rappelle que les eaux brutes des captages AEP de Souain Perthes-les-Hurlus et Dontrien, ainsi que les eaux de la rivière Dormoise (au niveau du lavoir de Rouvroy Ripont) ont aussi été échantillonnées (en juin 2023) pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du chlore dans ClO_4^-.

3.4.4 Résultats

Les résultats analytiques ont été consignés dans les tableaux placés en Annexe I du présent manuscrit et présentés sur les cartes de la Figure 425 et de la Figure 426.

Occurrences d'ions chlorate et perchlorate

Les eaux de surface des rivières Dormoise et Marson sont significativement marquées par les ions perchlorate. Les concentrations s'établissent entre 20 et 33 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ (entre 2016 et 2023) pour la Dormoise au niveau du lavoir de Rouvroy Ripont et dans des gammes de concentrations du même ordre, de 14 et 30 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ (entre 2016 et 2023), pour la rivière Marson au Pont-de-Marson. Globalement, ces concentrations apparaissent stables sur la période 2016 et 2023 (6 à 8 campagnes d'échantillonnage). Les résultats en ions chlorate sont difficilement exploitables et interprétables compte tenu des limites de quantification du laboratoire évolutives et élevées. Elles s'élèvent à 191 $\mu gClO_3^-.L^{-1}$ et 294 $\mu gClO_{3-}.L^{-1}$ en 2023 pour respectivement les rivières Dormoise et Marson. Ces eaux sont faiblement nitratées (< 5 $mgNO_3^-.L^{-1}$) et ne présente pas de concentrations en ammonium supérieures à la limite de quantification (0,05 $mgNH_4^+.L^{-1}$).

Les eaux des captages AEP de Souain Perthes-les-Hurlus et de Dontrien sont légèrement perchloratées avec des concentrations stables (entre 2021 et 2023) qui oscillent respectivement entre 6 et 8 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$ et 7 et 14 $\mu gClO_4^-.L^{-1}$. On constate à Perthes comme à Dontrien, l'absence d'influence de la javellisation sur les concentrations en ions perchlorate sur les eaux distribuées (comparativement aux eaux brutes) (cf. Tableau 70 ci-après). Par contre, l'impact de l'Eau de Javel, renfermant des concentrations de l'ordre de 20 $gClO_3^-.L^{-1}$, sur les eaux traitées et distribuées est significatif, avec une augmentation de l'ordre de 10 à 15 fois des concentrations en ions chlorate dans les eaux traitées comparativement aux eaux brutes. Ces analyses montrent que la caractérisation du *Fingerprint* impliquant les ions chlorate ne peut s'envisager par l'échantillonnage et l'analyse des eaux traitées et distribuées, contrairement aux ions perchlorate.

Date de prélèvement	Libellé	Localisation	Typologie des eaux	ClO_3^-	ClO_4^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
				µg.L^{-1}		mg.L^{-1}		
22/06/2023	Perthes brute	Captage de Souain Perthes-les-Hurlus	Eaux souterraines brutes	-	**6,1**	-	-	-
10/07/2023	Perthes brute		Eaux souterraines brutes	**5**	**7,77**	6,4	9,5	7,4
11/07/2023	Perthes trait		Eaux distribuées	**81**	**7,82**	6,7	8,9	6,9
11/07/2023	Perthes Javel		Javel de traitement des eaux	**19 135 000**	<50	**12 061**	<50	114
22/06/2023	DONT	Captage de Dontrien	Eaux souterraines brutes	-	**8,86**	-	-	-
12/07/2023	DONT brute		Eaux souterraines brutes	**13**	**13,4**	29,6	43,5	15,5
12/07/2023	DONT trait		Eaux distribuées	**122**	**14,4**	30,2	43,8	16
12/07/2023	DONT Javel		Javel de traitement des eaux	**21 855 000**	<50	**125 944**	<50	88,2

Tableau 70 : Résultats analytiques concentrations en ions chlorate et perchlorate dans les eaux brutes, les eaux javellisées et l'Eau de Javel de traitement pour les EDCH de Souain Perthes-les-Hurlus et Dontrien (2023).

Occurrence de composés nitroaromatiques

Les eaux perchloratées des rivières Dormoise, Marson et des EDCH de Dontrien et de Souain Perthes-les-Hurlus montrent aussi la présence de NAC avec des concentrations (∑NAC) entre 60 et 120 ng.L^{-1}. L'ensemble des points échantillonnés et analysés pour les NAC se caractérise par la prévalence dans les cortèges des isomères du DNT (cf. Figure 423 et Figure 424).

Deux signatures se dégagent. Les eaux du captage de Perthes sont nettement dominées par le 2,6-DNT alors que les eaux des rivières Dormoise, Marson et de l'AEP de Dontrien montrent un *Fingerprint* dans lequel prévaut le 2,4-DNT. Ces concentrations sont associées à des traces de 2-nitrotoluène (impureté et intermédiaire de production des DNT). Des traces d'ADNT ont aussi été quantifiées dans les eaux de la Dormoise en 2023, témoignant de processus de biodégradation réductive du TNT.

On retrouve dans le secteur de Suippes des signatures hydrochimiques déjà observées par ailleurs sur d'autres secteurs d'étude du front, dominées par les isomères du DNT et les ions perchlorate, avec selon les secteurs la prévalence d'un ou deux isomères du DNT (généralement les 2,3-DNT, 2,4-DNT et 2,6-DNT), comme en Argonne, à La Chapelotte.

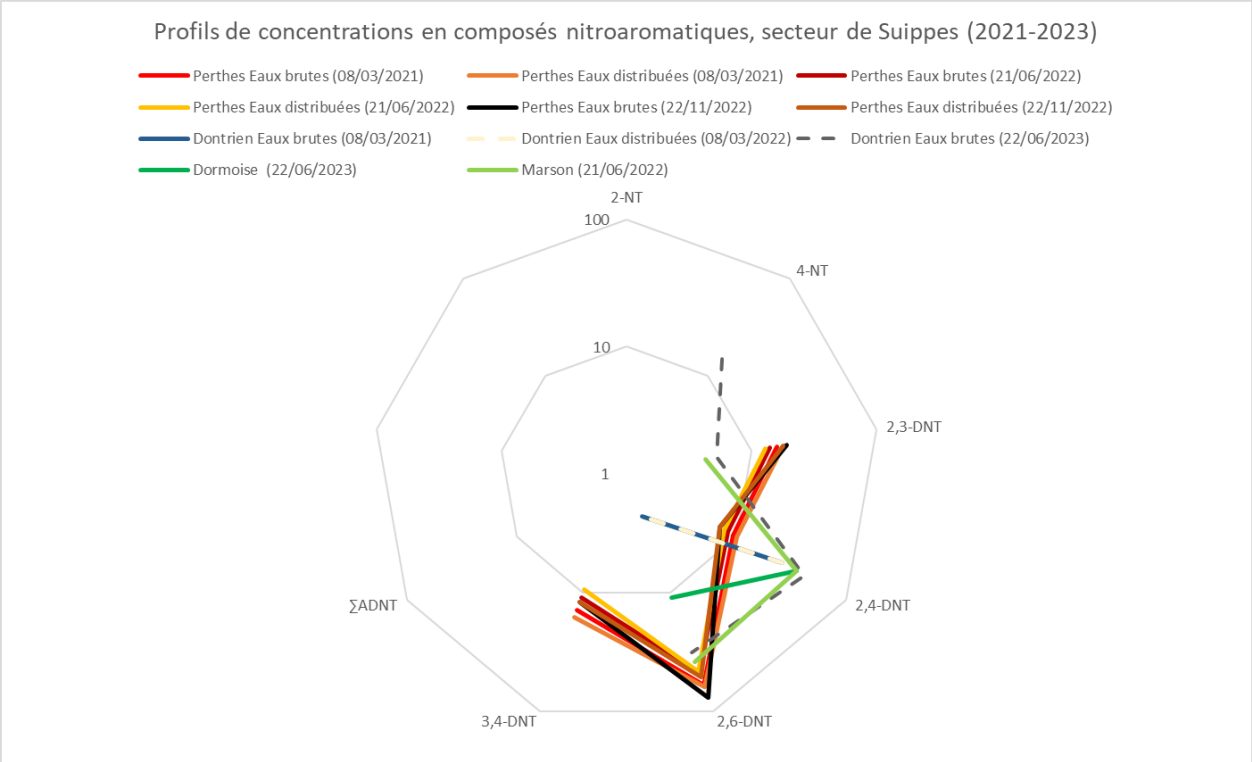


Figure 423 : Profils de concentrations en composés nitroaromatiques, secteur de Suippes (2021- 2023).

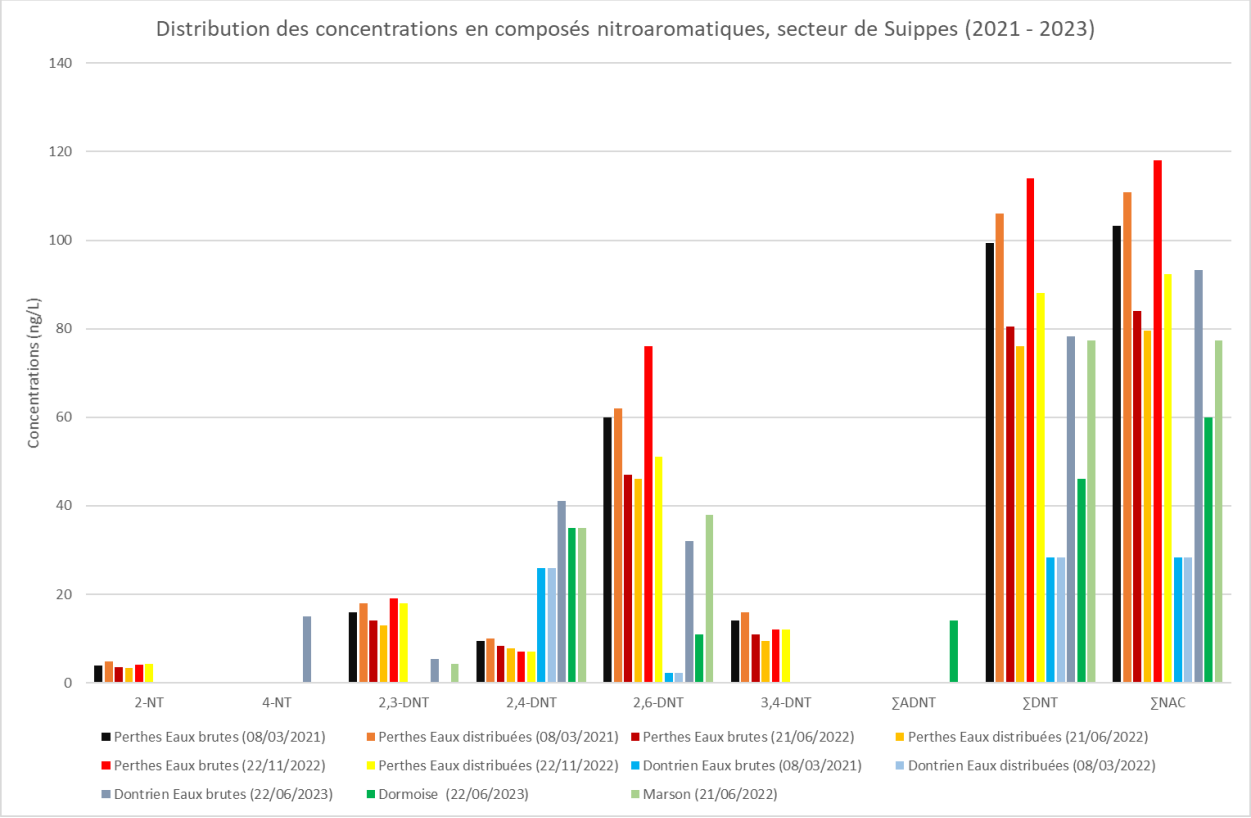


Figure 424 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques, secteur de Suippes (2021-2023).

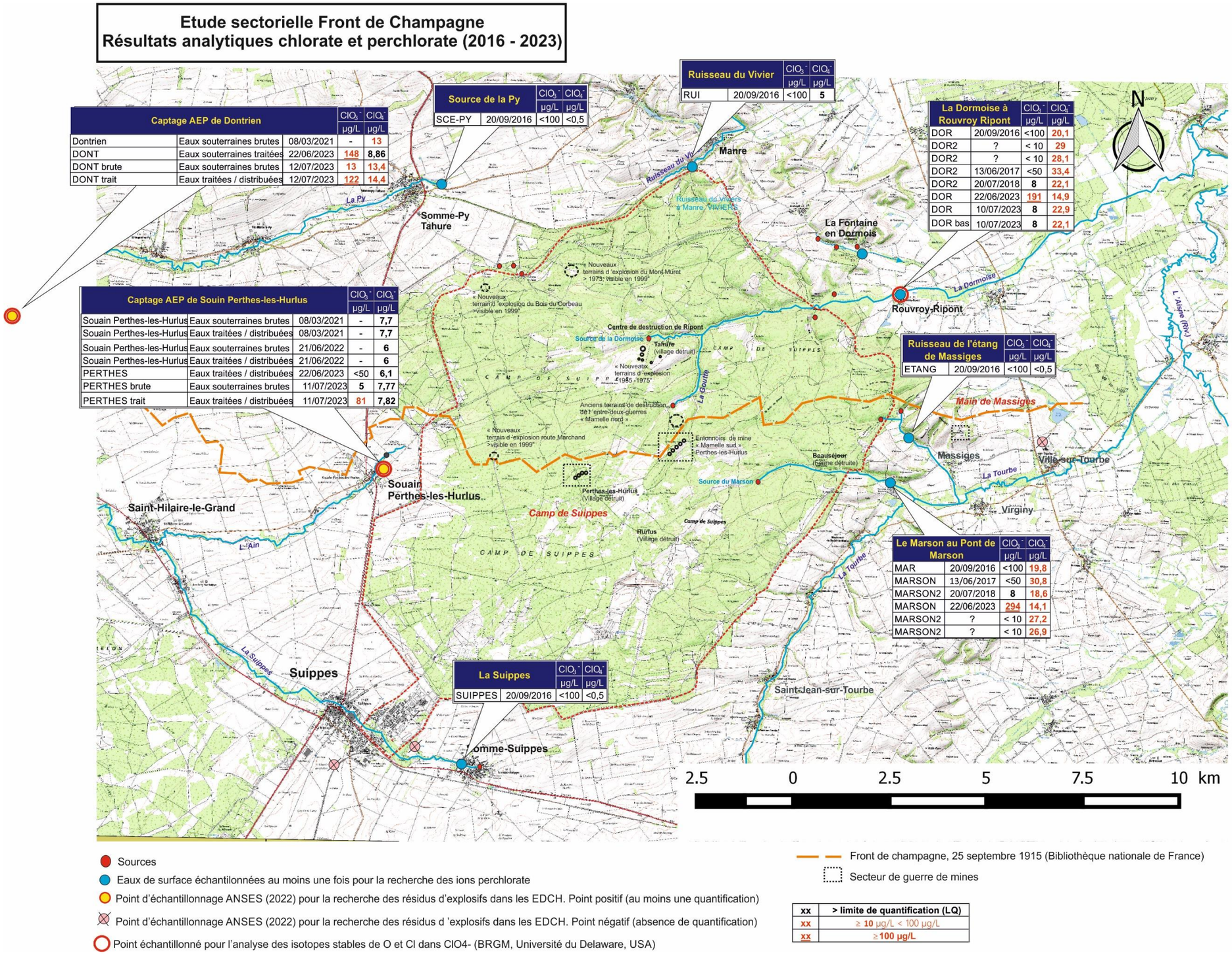
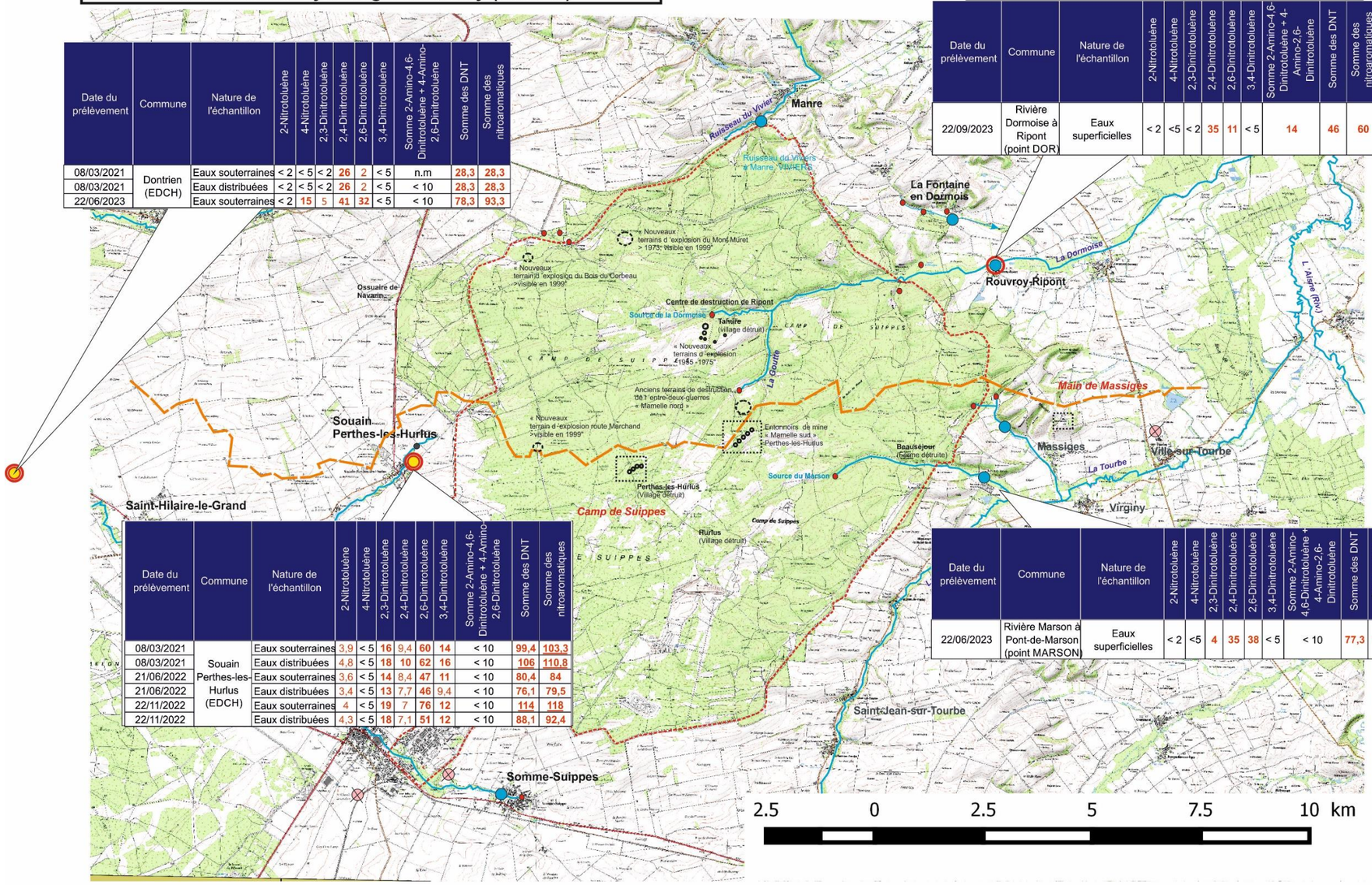


Figure 425 : Compilation des résultats analytiques des concentrations en ions chlorate et perchlorates des eaux échantillonnées dans le secteur est marnais de Suippes (2016-2023).

Etude sectorielle Front de Champagne
Résultats analytiques composés nitroaromatiques (2021 - 2023)
Valeurs positives. Concentrations en ng/L
Laboratoire d 'Hydrologie de Nancy (ANSES)



Date du prélèvement	Commune	Nature de l'échantillon	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques
08/03/2021	Dontrien (EDCH)	Eaux souterraines	< 2	< 5	< 2	26	2	< 5	n.m	28,3	28,3
08/03/2021		Eaux distribuées	< 2	< 5	< 2	26	2	< 5	< 10	28,3	28,3
22/06/2023		Eaux souterraines	< 2	15	5	41	32	< 5	< 10	78,3	93,3

Date du prélèvement	Commune	Nature de l'échantillon	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques
22/09/2023	Rivière Dormoise à Ripont (point DOR)	Eaux superficielles	< 2	<5	< 2	35	11	< 5	14	46	60

Date du prélèvement	Commune	Nature de l'échantillon	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques
08/03/2021	Souain Perthes-les-Hurlus (EDCH)	Eaux souterraines	3,9	< 5	16	9,4	60	14	< 10	99,4	103,3
08/03/2021		Eaux distribuées	4,8	< 5	18	10	62	16	< 10	106	110,8
21/06/2022		Eaux souterraines	3,6	< 5	14	8,4	47	11	< 10	80,4	84
21/06/2022		Eaux distribuées	3,4	< 5	13	7,7	46	9,4	< 10	76,1	79,5
22/11/2022		Eaux souterraines	4	< 5	19	7	76	12	< 10	114	118
22/11/2022		Eaux distribuées	4,3	< 5	18	7,1	51	12	< 10	88,1	92,4

Date du prélèvement	Commune	Nature de l'échantillon	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques
22/06/2023	Rivière Marson à Pont-de-Marson (point MARSON)	Eaux superficielles	< 2	<5	4	35	38	< 5	< 10	77,3	77,3

- Sources
- Eaux de surface échantilonnées au moins une fois pour la recherche des ions perchlorate
- Point d'échantillonnage ANSES (2022) pour la recherche des résidus d'explosifs dans les EDCH. Point positif (au moins une quantification)
- Point d'échantillonnage ANSES (2022) pour la recherche des résidus d 'explosifs dans les EDCH. Point négatif (absence de quantification)
- Point échantillonné pour l'analyse des isotopes stables de O et Cl dans ClO4- (BRGM, Université du Delaware, USA)
- Front de champagne, 25 septembre 1915 (Bibliothèque nationale de France)
- Secteur de guerre de mines

xx	> limite de quantification (LQ)
xx	≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xx	≥100 ng/L

Figure 426 : Compilation des résultats analytiques des concentrations en composés nitroaromatiques des eaux échantillonnées dans le secteur est marnais de Suippes (2021-2023).

3.5. ETUDE APPROFONDIE DE LA CHIMIE DES EAUX DES PUITS AEP DE NEUFCHATEL-SUR-AISNE ET DE CRAMONT

3.5.1 Le captage AEP de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne)

Le premier puits AEP est celui de Neufchâtel-sur-Aisne (d'indice BSS000HKGF / 01081X0013/F) situé dans la vallée de l'Aisne (et à l'extrémité sud du département du même nom), dans les arrières lignes allemandes (lignes de front stabilisées de 1916), à l'est du Chemin des Dames. A noter que de nombreux terrains de destruction de munitions furent identifiés dans le cadre de l'inventaire national du BRGM[2075] plus à l'est, le long de la vallée de la rivière Retourne, correspondant à la position d'anciens dépôts ex-allemands. Aucun site de pétardement n'a été formellement reconnu dans le secteur de Neufchâtel. L'existence de dépôts dans ce secteur ne peut toutefois être exclue. Ce puits vertical, alimentant le réservoir échantillonné, est profond de 67,2 m et capte la Craie (indifférenciée).

Le puits de Neufchâtel est situé dans un secteur aux ECDH fortement perchloratées à la croisée des limites des départements des Ardennes, de l'Aisne et de la Marne (cf. Figure 428 et Figure 429). Le puits de Neufchâtel est connu par ses exploitants et les ARS pour être fortement perchloraté, avec des concentrations en ClO_4^- très fluctuantes en fonction du temps (d'un facteur 4 à 5) (cf. Figure 427 ci-dessous).

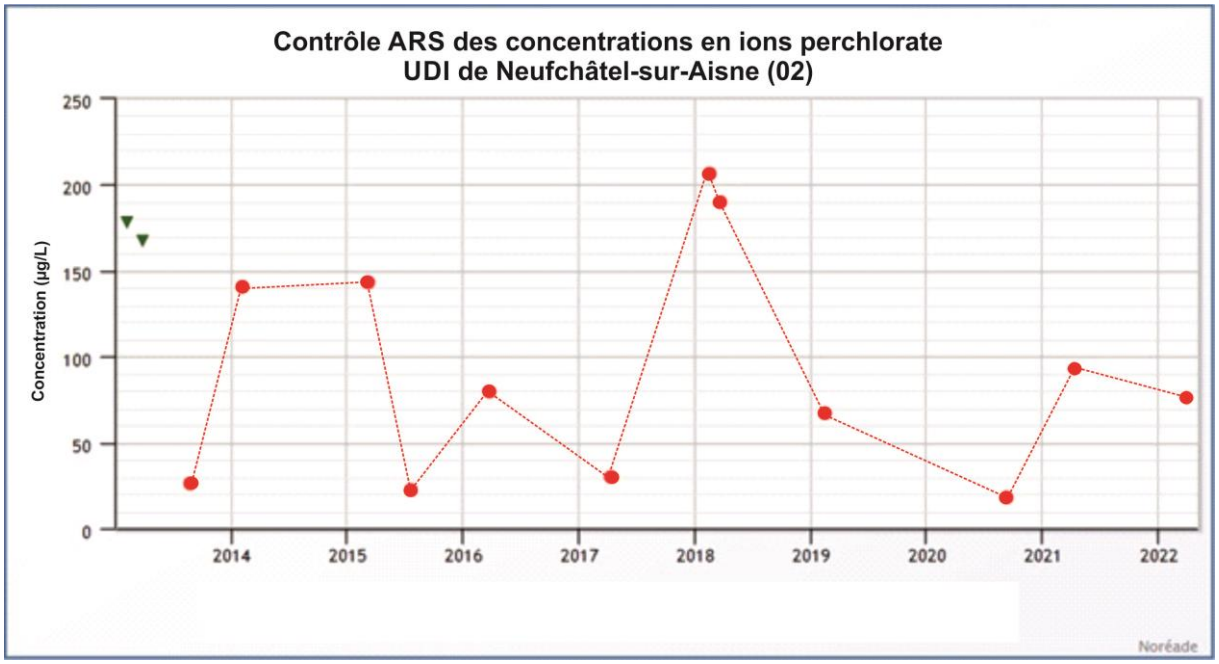


Figure 427 : Evolution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH de Neufchâtel-sur-Aisne entre 2014 et 2022[2076].

Les eaux de ce puits ont aussi été reconnues impactées par les NAC lors de la campagne exploratoire nationale de l'ANSES sur les résidus d'explosifs (2020- 2021) avec ∑NAC = 857 $ng.L^{-1}$ (concentration maximale mesurée en mars 2021).

[2075] Hubé, D., Cailleau, C. (2022). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales*. Rapport final. BRGM/RP-68476-FR, 191 p., 3 ann.

[2076] Source : Noréade (2023).

La nappe de la Craie est libre dans ce secteur alors que plus au sud-ouest, au droit de la ligne de front et du Chemin des Dames, la Craie passe sous recouvrement Eocène (plateau du Chemin des Dames) (cf. Figure 429).

Les écoulements de la nappe libre de Craie sont globalement orientés du nord vers le sud dans le secteur de Sissonne-Berry-au-Bac-Neufchâtel-sur-Aisne, et du nord-est vers le sud-ouest dans le nord du département (cf. Figure 429). On notera que le secteur aux EDCH perchloratées dessine une bande nord-ouest / sud-est (ligne Saint-Quentin / Sissonne) perpendiculairement aux principales directions régionales d'écoulement. Le captage de Neufchâtel-sur-Aisne, est situé dans un environnement agricole marqué par la culture de la betterave sucrière.

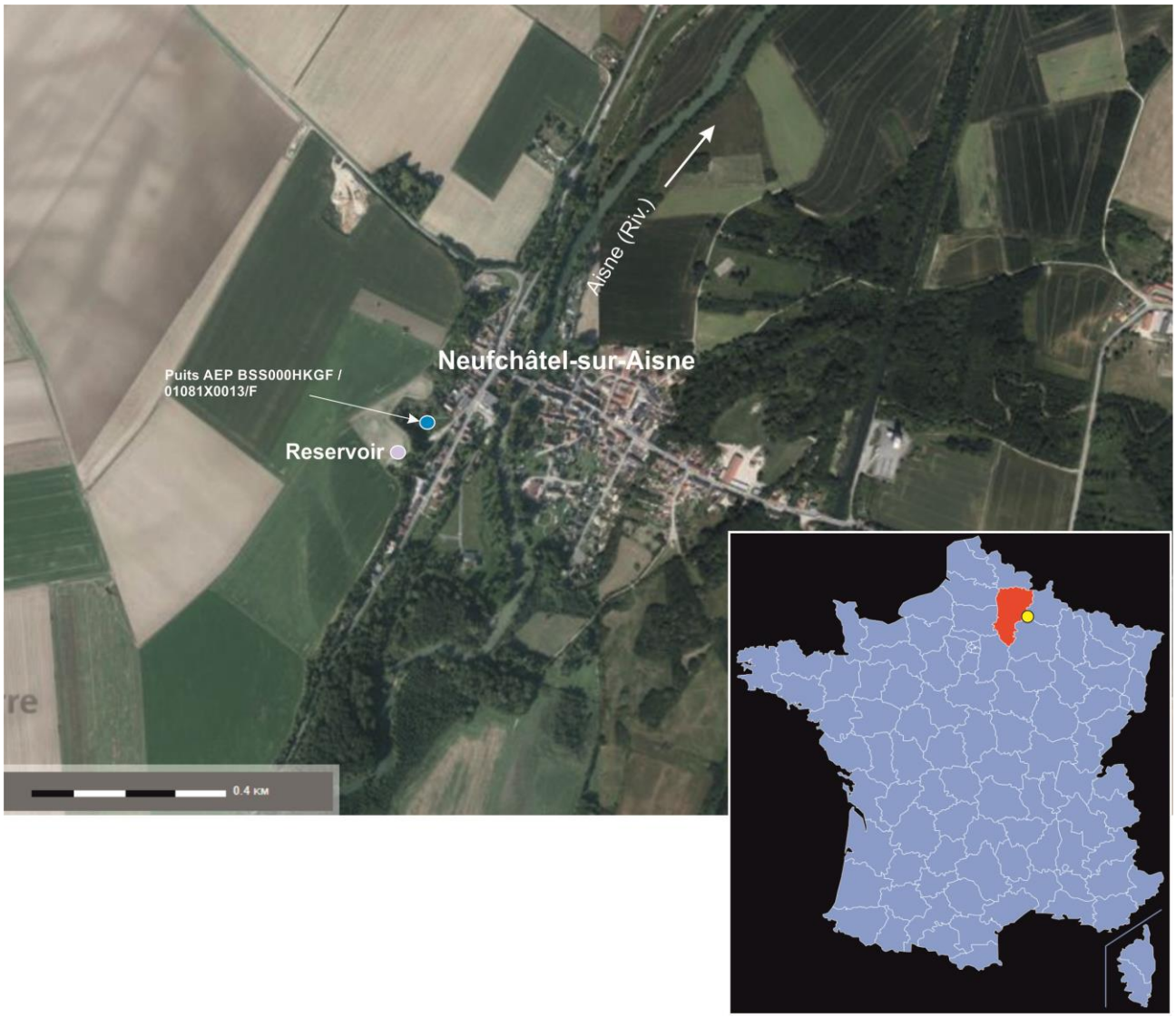
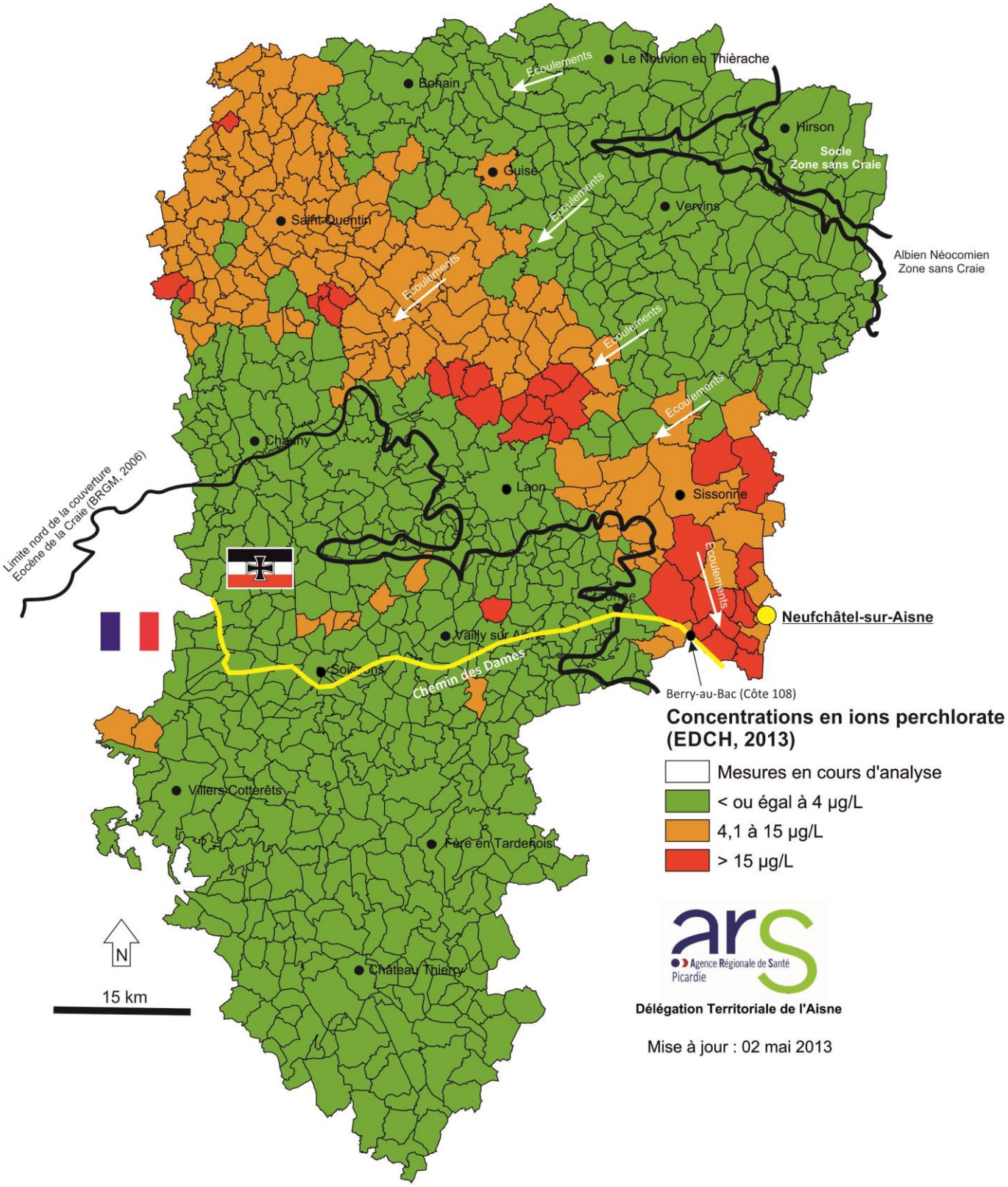


Figure 428 : Localisation du puits AEP de Neufchâtel-sur-Aisne.



Directions d'écoulement d'après P. Chrétien avec la collaboration de M.J. Féret, P. Guionie, J.L. Izac, J.P. Jegou, F. Joublin, C. Kiefer, C. Nail et C. Robelin (2006) – Picardie – Nappe libre de la craie – Campagne et carte piézométriques « basses eaux » 2005. Rapport final. BRGM/RP-54285-FR, 63 pages, 7 annexes.

Figure 429 : Localisation de l'AEP de Neufchâtel-sur-Aisne et distributions des concentrations en ions perchlorate des EDCH du département de l'Aisne (2013). Habillage par des éléments de contexte historique et hydrogéologique.

3.5.2 Le puits AEP de Cramont (département de la Somme)

Le second puits est celui de Cramont (d'indice BSS000DERG / 00333X0043/F2), dans le département de la Somme, pourtant situé à près de 45 km au nord-ouest des lignes de front de la Somme (cf. Figure 430). Le puits de Cramont de 50 m de profondeur fonctionne par intermittence et capte la Craie à silex du Coniacien (Crétacé supérieur). Ce puits est doublement intéressant dans le cadre des réflexions conduites dans cette recherche.

Loin du front, le puits AEP de Cramont (et les puits des communes aux alentours) est réputé perchloraté depuis 2013 (bilan ARS des EDCH pour le département de la Somme) et est régulièrement suivi depuis pour ce paramètre par l'ARS (cf. Figure 431). Les concentrations en ions perchlorate s'établissent au moment de l'échantillonnage pour la campagne nationale exploratoire de l'ANSES pour les résidus d'explosifs à 8,5 $\mu g ClO_4^-.L^{-1}$ (eaux brutes et eaux traitées) (31/05/2021). Le marquage perchloraté dessine un panache centré sur Conteville Domléger et s'étendant en direction du sud-ouest selon la direction régionale des écoulements de la nappe libre de la Craie (cf. Figure 433). Cette distribution des concentrations (avec un gradient selon les écoulements) est typique des panaches de pollution des eaux souterraines.

Les eaux du puits sont aussi marquées par un cortège atypique de NAC au sein duquel prévalent des DNT, ADNT et DNB identifié en 2020 par la campagne nationale exploratoire ANSES sur les résidus d'explosifs ($\sum$NAC = 105 $ng.L^{-1}$, 31/05/2021).

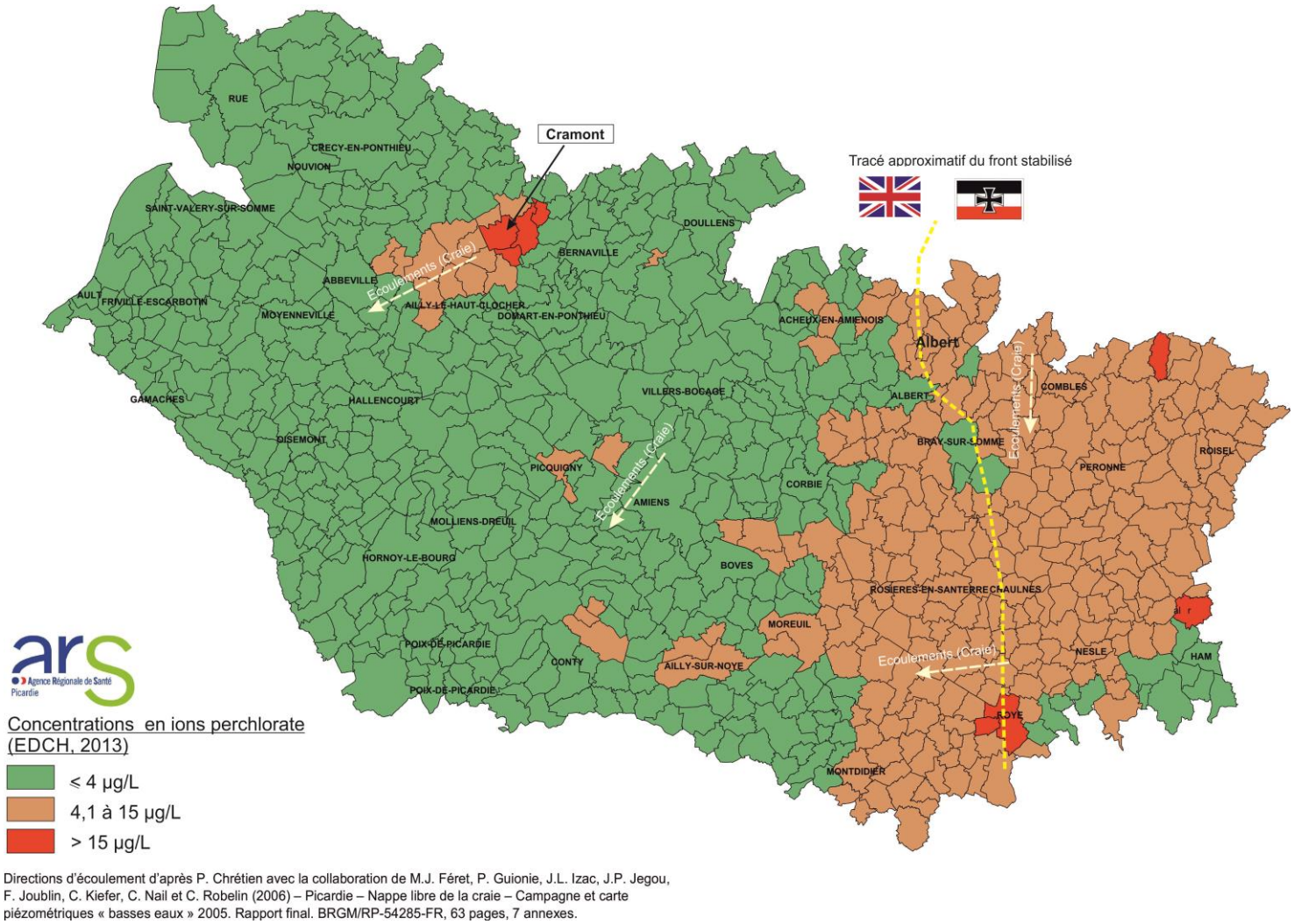
Les recherches historiques menées dans le cadre de ce doctorat démontrent que ce puits se situe en aval du site de désobusage industriel exploité d'abord par un premier industriel, défaillant (Armes Georges & Co et Bowen) suite à un accident en 1920, puis par F.N. Pickett & Fils, ce dernier ayant procédé ensuite à la neutralisation sur ce site de près de 11 000 tonnes de munitions. Rien dans les archives consultées ne précise les lieux, les pratiques, de démolition. Les seuls indices de terrains sont ceux (i) du terrain longeant la RD267, bosselé, où de nombreux obus ont été mis à l'affleurement et correspondant possiblement au terrain d'explosion exploité par l'un ou les deux industriels (cf. Figure 431) puis, (ii) sans doute possible, le terrain du Bois Brûlé, un boqueteau évité par les labours, qui coïncide avec un terrain de brûlage où furent neutralisés des allumeurs de grenades « œuf » allemandes en grand nombre. Le captage AEP de Cramont se situe à 800 m en aval du terrain d'explosion.

L'historique n'est pas clair sur la nature du dépôt de Conteville visé par les destructions dans l'entre-deux-guerres. S'il est certain qu'il s'agissait d'un dépôt britannique (situé dans un secteur sous contrôle britannique), le donneur d'ordre pour Pickett et son prédécesseur ayant été le *Disposal Board* en charge de la liquidation des surplus britanniques, des reconnaissances de terrain tendent à prouver que du matériel allemand fut aussi démoli à Conteville (découvertes de projectiles ex-allemands au droit du terrain d'explosion et d'allumeurs de grenades calcinés du Bois Brûlé) (cf. Figure 431). Les obus et *Minen* allemands découverts possédaient des ceintures lisses, preuves qu'ils n'avaient pas été tirés et provenaient de dépôts de munitions ex-allemandes

L'hypothèse que le dépôt de Conteville ait été un centre de rassemblement du *Salvage* britannique semble probable. A noter que d'anciennes installations militaires datant de la Seconde Guerre mondiale existent également dans ce secteur (ancien aérodrome allemand) très densément bombardé durant le second conflit mondial (rampes de lancement de V1 à Domléger). Le captage de Cramont est situé dans un environnement agricole marqué, comme à Neufchâtel-sur-Aisne, par la culture de la betterave sucrière.

Figure 430 : Localisation du captage de Cramont et des sites de destruction de munitions. Aperçu photographique des projectiles allemands (obus et Minen) découvert à l'emplacement supposé du terrain d'explosion[2077].

[2077] Brou, L, (2019).



Directions d'écoulement d'après P. Chrétien avec la collaboration de M.J. Féret, P. Guionie, J.L. Izac, J.P. Jegou, F. Joublin, C. Kiefer, C. Nail et C. Robelin (2006) – Picardie – Nappe libre de la craie – Campagne et carte piézométriques « basses eaux » 2005. Rapport final. BRGM/RP-54285-FR, 63 pages, 7 annexes.

Figure 431 : Marquage perchloraté du secteur de Cramont – Conteville –Domléger (département de la Somme) (2013). Localisation du captage de Cramont et habillage par des éléments historiques et hydrogéologiques.

3.5.3 Echantillonnages réalisés à Neufchâtel-sur-Aisne et Cramont

Les EDCH de Neufchâtel-sur-Aisne et de Cramont (eaux brutes et eaux traitées) ont été échantillonnées et analysées pour la recherche de résidus d'explosifs par le LHN dans le cadre de la campagne nationale ANSES respectivement les 31/05/2021 et 15/03/2021. Les eaux brutes ont été échantillonnées dans le cadre de cette recherche à Cramont le 12/02/2023 et à Neufchâtel-sur-Aisne le 09/08/2023 pour la recherche des ions chlorate et perchlorate, nitrate et ammonium (sur eaux brutes filtrées à 0,45 µm et conditionnées dans des flacons de 100 mL en PE). Les NAC ont été analysés par le LHN (échantillon de 2 x 1 L en verre brun) sur l'échantillon constitué à Cramont le 12/02/2023. On rappelle que les eaux brutes des deux captages ont aussi été échantillonnées (en février et août 2023) pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du chlore dans ClO_4^-.

3.5.4 Résultats

Les résultats analytiques ont été consignés dans les tableaux placés en Annexe I du présent manuscrit.

A Neufchâtel-sur-Aisne, les eaux perchloratées du captage AEP montrent des concentrations très fluctuantes en ions perchlorate (cf. Figure 427) ; elles étaient de l'ordre de 20 µgClO_4^-.L^{-1} en août 2023, au moment de l'échantillonnage pour les analyses isotopiques et des NAC. Ces eaux montrent une signature toujours marquée par les DNT (jusqu'à 857 ng.L^{-1}) avec une prévalences des 2,3-DNT, 2,6-DNT et 3,4-DNT (cf. Figure 432).

A Cramont la signature hydrochimique est singulière, avec toujours l'occurrence (parmi le cortège d'environ 180 ng.L^{-1}) de DNT mais aussi de DNB et des ADNT (métabolites du TNT) (cf. Figure 433). La présence de ces métabolites atteste de l'occurrence de processus de biodégradation (biotransformation réductive) du TNT.

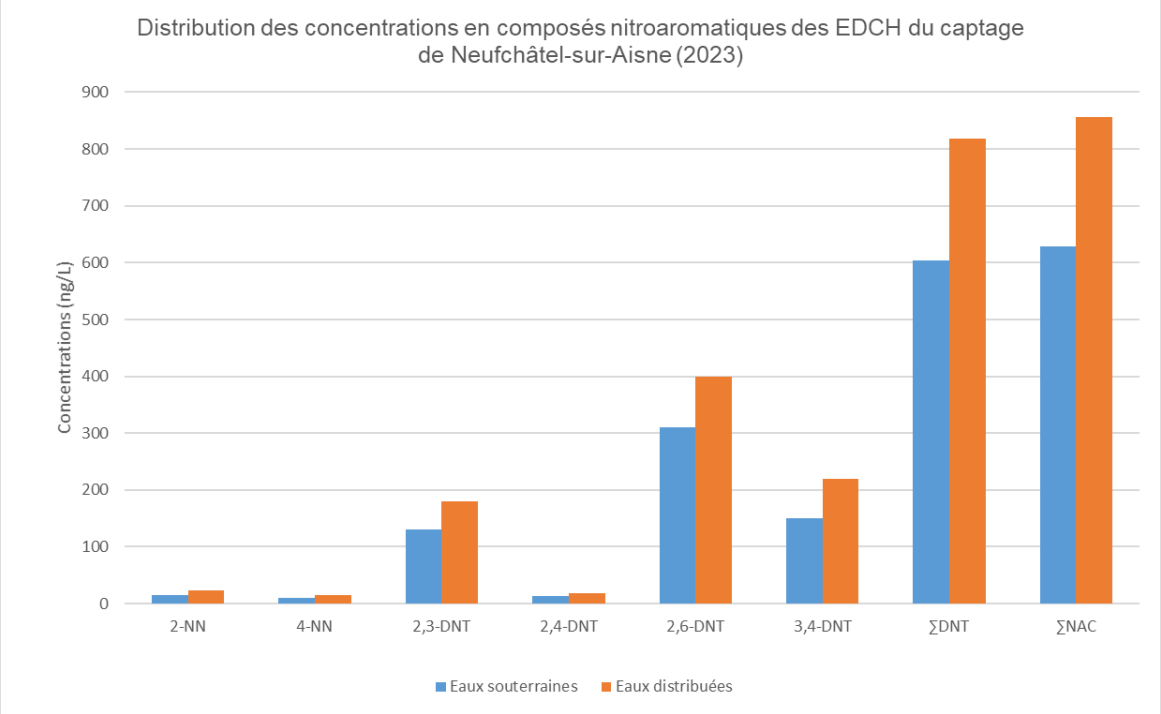


Figure 432 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques des EDCH du captage de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne).

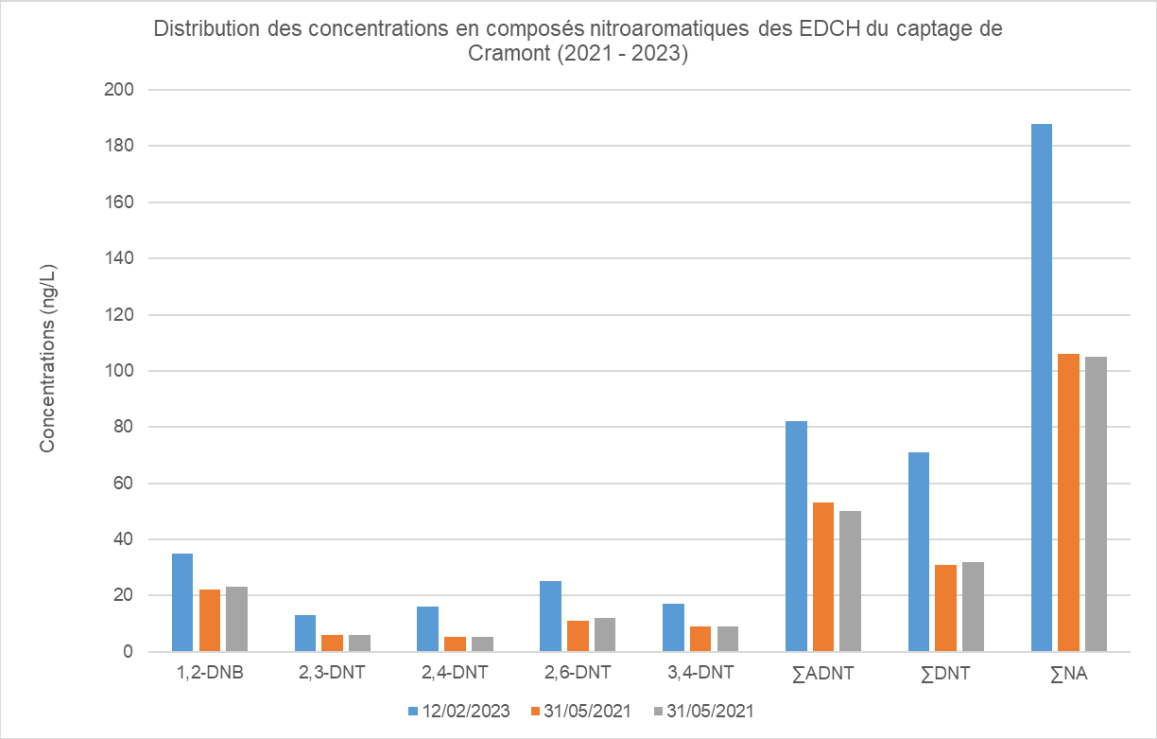


Figure 433 : Distribution des concentrations en composés nitroaromatiques des EDCH du captage de Cramont (département de la Somme)

4. Cortèges de composés d'origine pyrotechnique dans les eaux. *Fingerprint* des sources ou des processus environnementaux ?

4.1. INTRODUCTION

Les études « diagnostics » nationales et régionales sur la présence de résidus d'exploisfs dans les EDCH menées sous l'égide de l'ANSES en 2020 et 2021, ainsi que les études séctorielles originales réalisées à la faveur des missions du BRGM et spécifiquement pour cette recherche mettent en évidence l'occurrence dans les eaux souterraines, de surface et de boisson, de composés entrant dans la formulation des poudres et explosifs anciens. Il s'agit de composés inorganiques (ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-)) et organiques (NAC). Le présent chapitre de cette Section 4e vise à explorer les liens entre la nature de ces composés, la typologie des cortèges (association de composés) identifiés et leur(s) origine(s) la ou les plus plausibles. Les relations entre les occurrences de composés énergétiques dans les eaux et leur(s) origine(s) explorés dans ce chapitre, livrent une grille de lecture éclairante pour interpreter au mieux les résultats des études sectorielles dont les résultats ont été présentés dans ce qui précède.

4.2. *FINGERPRINT* DES IONS CHLORATE ET PERCHLORATE. UNE APPROCHE ANALYTIQUE ET ISOTOPIQUE

4.2.1 Origines des ions chlorate

Les sels de chlorate ont une origine synthétique. Ils sont obtenus par l'électrolyse de saumures (NaCl) sous forte intensité électrique. NaCl et l'eau se décomposent alors selon la réaction $NaCl + 3\ H_2O \rightarrow NaClO_3 + 3\ H_2$. Il n'existe aucune indication de l'occurrence de ces sels de chlorate à l'état naturel.

Seule l'Armée française eut recours de façon massive et systématique durant toute la guerre aux explosifs chlorates (*Cheddites*, explosif « S ») pour charger (i) les grenades, (ii) les projectiles d'artillerie de tranchée de gros calibres et (iii) les fourneaux de destruction employés pour la guerre de mines. On rappelle ici qu'il s'agissait de mélanges hygrophobes de $NaClO_3$ avec de la paraffine. L'Armée allemande utilisa les sels de chlorate à petite échelle dans certains détonateurs. Il n'existe aucune indication historique de l'usage d'explosifs chlorates dans l'Armée britannique. Les sels de chlorate ne furent plus utilisés dans les chargements des engins explosifs postérieurs à la Première Guerre mondiale. La présence d'ions chlorate dans des eaux (non javellisées) ne montrant aucune potentialité de biodégradation des ions perchlorate (conditions physico-chimiques aérobies, oxydantes) signe l'influence sur les eaux de résidus d'explosifs français datant de la Grande Guerre.

4.2.2 Origines et signatures isotopiques des ions perchlorate

Contrairement au ions chlorate, les ions perchlorate peuvent avoir une origine synthétique (par électrolyse de bain de saumures chloratées) et une origine naturelle (dans des nitrates du Chili), les premiers ayant été produits pour la fabrication des explosifs anciens, les seconds accompagnent les nitrates dans les engrais. L'empreinte perchloratées des eaux souterraines et de surface exposée dans ce qui précède peut donc avoir une ou plusieurs origines et l'occurrence des ions perchlorate ne suffit pas à elle seule à discriminer une origine militaire ancienne liée à l'usage d'explosifs perchlorates d'une part, d'une origine agricole historique d'autre part.

L'analyse des abondances relatives des isotopes stables de O, Cl au sein de ClO_4^- permet, au regard de l'état de la recherche, notamment nord-américaine, de discriminer les deux origines. Les résultats des mesures des abondances isotopiques des isotopes stables de l'oxygène et du chlore ($\delta^{18}O$, $D^{17}O$ et $\delta^{37}Cl$) dans ClO_4^- sont rassemblés dans le tableau placé en Annexe J du présent manuscrit. Au total 33 mesures originales des $\delta^{18}O$, $D^{17}O$ et 28 mesures de $\delta^{37}Cl$ furent exploitées dans le cadre de cette recherche. Ces mesures concernent différentes matrices (eaux, explosifs, effluents d'électrosynthèse, sols pollués) et de différentes origines (industrielle, historique (explosifs), eaux de surface, eaux souterraines). Les provenances des mesures des eaux souterraines marquées par des pollutions industrielles concentrées et celles issues de sources, d'eau de surface et d'eau souterraine marquées par une pollution diffuse, ont volontairement été laissées anonymes. L'objectif est (i) d'explorer la diversité des signatures isotopiques au regard de la diversité des matrices et provenances, (ii) de comparer les signatures mises en évidence dans les explosifs perchloratés anciens de 1914-1918 à celles de sels de perchlorate contemporains et (iii) de comparer ces signatures avec celles observées dans les eaux souterraines et de surface.

Les résultats ont été synthétisés en trois diagrammes : $\delta^{37}Cl$ versus $\delta^{18}O$ (cf. Figure 434), avec un zoom centré sur les ions perchlorate synthétiques (cf. Figure 435), et $D^{17}O$ versus $\delta^{18}O$ (cf. Figure 434)

On constate que la très grande majorité des points possèdent une signature isotopique caractéristique des ions perchlorate synthétiques avec des valeurs de $D^{17}O$ très peu dispersées, proches de 0 ‰ et avec une médiane de 0,2 ‰ (et 63 % des points de mesure avec un $D^{17}O$ positif). Par contre, on constate qu'il n'existe pas de pôle synthétique unique mais une grande dispersion des valeurs de $\delta^{18}O$ avec une médiane de -18,7 ‰, entre des valeurs extrêmement appauvries (eaux souterraines de l'est rémois) (min : -30,4 ‰) et un maximum de -12 ‰ pour des ions perchlorate des eaux marquées par une pollution diffuse (pour les ions perchlorate strictement synthétiques). Les AEP de Cramont, Allencombe et Dontrien, ainsi que la source FP5 (Four-de-Paris) apparaissent aussi proches des signatures mesurées les plus appauvries.

A contrario, on mesure un enrichissement significatif en $\delta^{18}O$ lors du passage par électrosynthèse des liqueurs chloratées (avec un $\delta^{18}O$ ~ 28‰) aux liqueurs perchloratées (avec un $\delta^{18}O$ ~ -16 ‰). Le $D^{17}O$ reste inchangé dans le processus. Les sels de perchlorate de sodium obtenus possèdent la même signature isotopique que les jus de synthèse d'où ils sont issus.

4.2.3 Un large spectre de signatures isotopiques synthétiques. Origines

Lors de ce processus d'électrosynthèse des sels de chlorate puis de perchlorate de sodium, la molécule d'eau et NaCl des saumures sont décomposés selon :

$$(1)\ NaCl + 3\ H_2O \rightarrow NaClO_3 + 3\ H_2$$
$$(2)\ NaClO_3 + H_2O \rightarrow NaClO_4 + H_2$$

L'eau utilisée en (1) est celle reprise en (2). Negrel et al., (2017)[2078] démontrent que lors du processus (1) (la production d'une mole de chlorate de sodium nécessite la décomposition de trois moles d'eau), que les molécules d'eau des effluents résiduaires s'enrichissent significativement en hydrogène lourd, le deutérium (^2H), l'hydrogène s.s (^1H) étant dégagé sous forme de dihydrogène gazeux (H_2).

[2078] Negrel, P., Ollivier, P., Flehoc, C., Hube, D. (2017). *An innovative application of stable isotopes (δ2H and δ18O) for tracing pollutant plumes in groundwater, Science of The Total Environment*, Volume 578, 2017, pages 495-501, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.214.

Un fractionnement similaire doit s'opérer en (2). L'enrichissement en deutérium des eaux des bains électrolytiques est lié au dégagement de l'hydrogène gazeux légers $^{1}H_2$ qui quitte le système en dégazant et en étant récupéré pour d'autres usages industriel contrairement à l'oxygène qui est conservé dans le système et distribué entre les molécules d'eau $H_2\underline{O}$ résiduaires et les ions chlorate ($Cl\underline{O}_3^-$) et perchlorate ($Cl\underline{O}_4^-$).

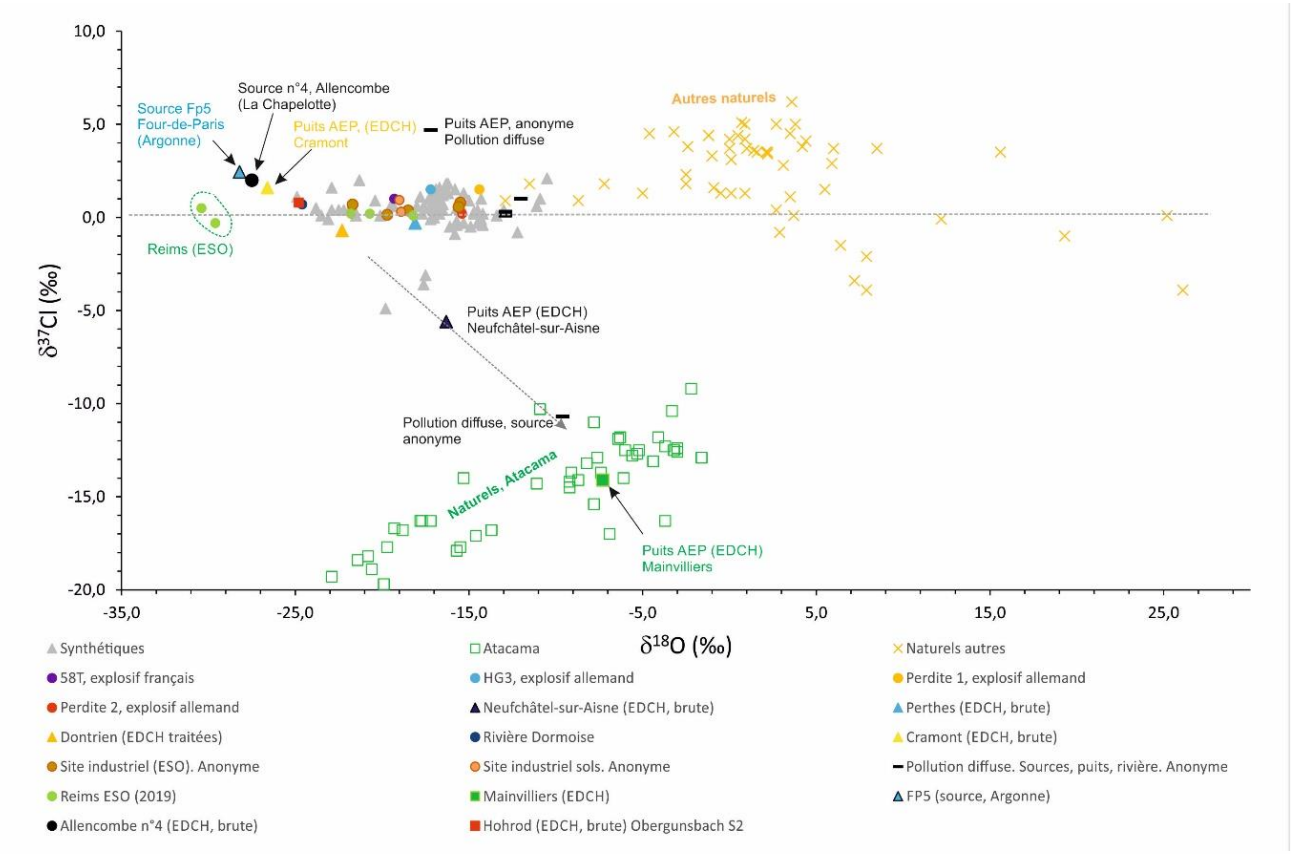
Les signatures isotopiques des isotopes stables de l'oxygène sont celles de l'eau utilisée pour confectionner les bains d'électrosynthèse. L'importante variabilité de $\delta^{18}O$ dans ClO_4^-, entre des valeurs très appauvries et des valeurs très enrichies, est le reflet de celle des molécules d'eau des bains. La signature isotopique des molécules d'eau utilisées pour fabriquer les saumures électrolysées est en effet très largement contrainte par les altitudes et latitudes des précipitations. Le fractionnement des isotopes stables de l'eau est thermodépendant et s'opère sur les isotopes de l'oxygène (^{16}O, ^{17}O et ^{18}O) dans un premier temps lors de l'évaporation avec un enrichissement dans les nuages en isotopes légers, puis dans un second temps lors des précipitations avec des eaux météoriques enrichies en isotopes lourds (à l'échelle saisonnière, de l'averse, etc.). La signature varie donc géographiquement d'un site à l'autre mais aussi dans le temps et en particulier en région montagneuse comme à Chedde (forte variabilité des altitudes des précipitations pluvieuses et neigeuses). La signature isotopique des isotopes stables de H_2O permet en effet d'évaluer l'altitude moyenne des bassins versants fluviaux et de distinguer les différents composants dans les eaux souterraines (eaux fluviales et infiltrations des précipitations). Des ions perchlorate synthétisés en plaine aux latitudes d'Hambourg, de Ludwigshafen ou de Nuremberg (*Perdites*), ne possèdent pas le même $\delta^{18}O$ que ceux sortis à plus haute altitude, mais à plus basse latitude, des usines alpines comme celles de Chedde, ou des usines pyrénéennes.

4.2.4 Signatures isotopiques singulières

Trois points de mesure possèdent des signatures isotopiques singulières. Le premier est celui des eaux de l'AEP de Mainvilliers (département du Loiret), provenant des eaux profondes et donc vraisemblablement anciennes (puits captant les Calcaires de la Beauce entre 105 et 109 m de profondeur) dans une zone de production agricole intensive en partie consacrée traditionnellement à la betterave sucrière, qui montre une signature $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ caractéristique des ions perchlorate naturels du type Atacama ($\delta^{37}Cl$ appauvri) (cf. Figure 434). Une origine agricole ancienne, en lien avec l'usage d'engrais à base de nitrates naturellement perchlorates du Chili, est vraisemblable en première approche.

Le second est celui des eaux du captage AEP de Neufchâtel-sur-Aisne qui montrent quant à elles une signature isotopique $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ marquée par un mélange d'ions d'origine synthétique (comme ceux présents dans les explosifs perchlorates anciens) et d'ions perchlorate possédant une signature s'apparentant à celle des ions perchlorate naturels de type Atacama. Ce captage captant la nappe de la Craie est situé (i) comme pour Mainvilliers, dans un environnement d'agriculture intensive de la betterave sucrière qui historiquement fut une grande consommatrice d'engrais à base de nitrates naturellement perchlorates du Chili et (ii) à quelques kilomètres à l'est des anciennes lignes de front et en aval d'une zone marquée plus au nord par de violents combats durant la Grande Guerre (secteur est du Chemin des Dames).

Il n'existe aucun indice de biodégradation des ions perchlorate à l'exception d'un seul point correspondant aux eaux d'un puits AEP (site confidentiel anonyme) impacté par de faibles concentrations en ClO_4^- et sollicitant une nappe marquée par une pollution diffuse. La biodégradation se traduit par un enrichissement des ions perchlorate résiduels en isotopes lourds du chlore ^{37}Cl et de l'oxygène ^{18}O et donc par une augmentation concomitante de $\delta^{37}Cl$ et de $\delta^{18}O$.



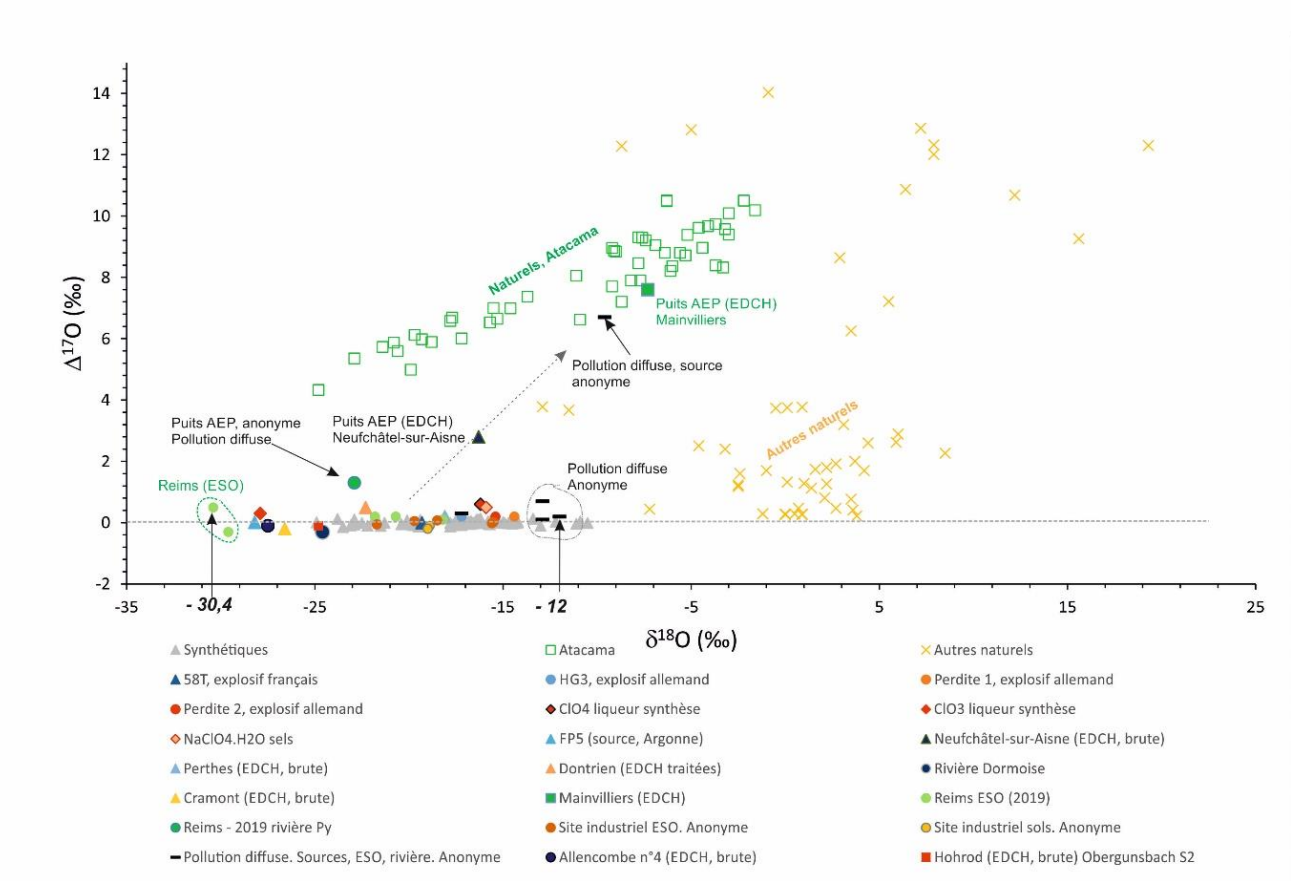


Figure 434 : Résultats $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ (haut) et $D^{17}O$ / $\delta^{18}O$ (bas).

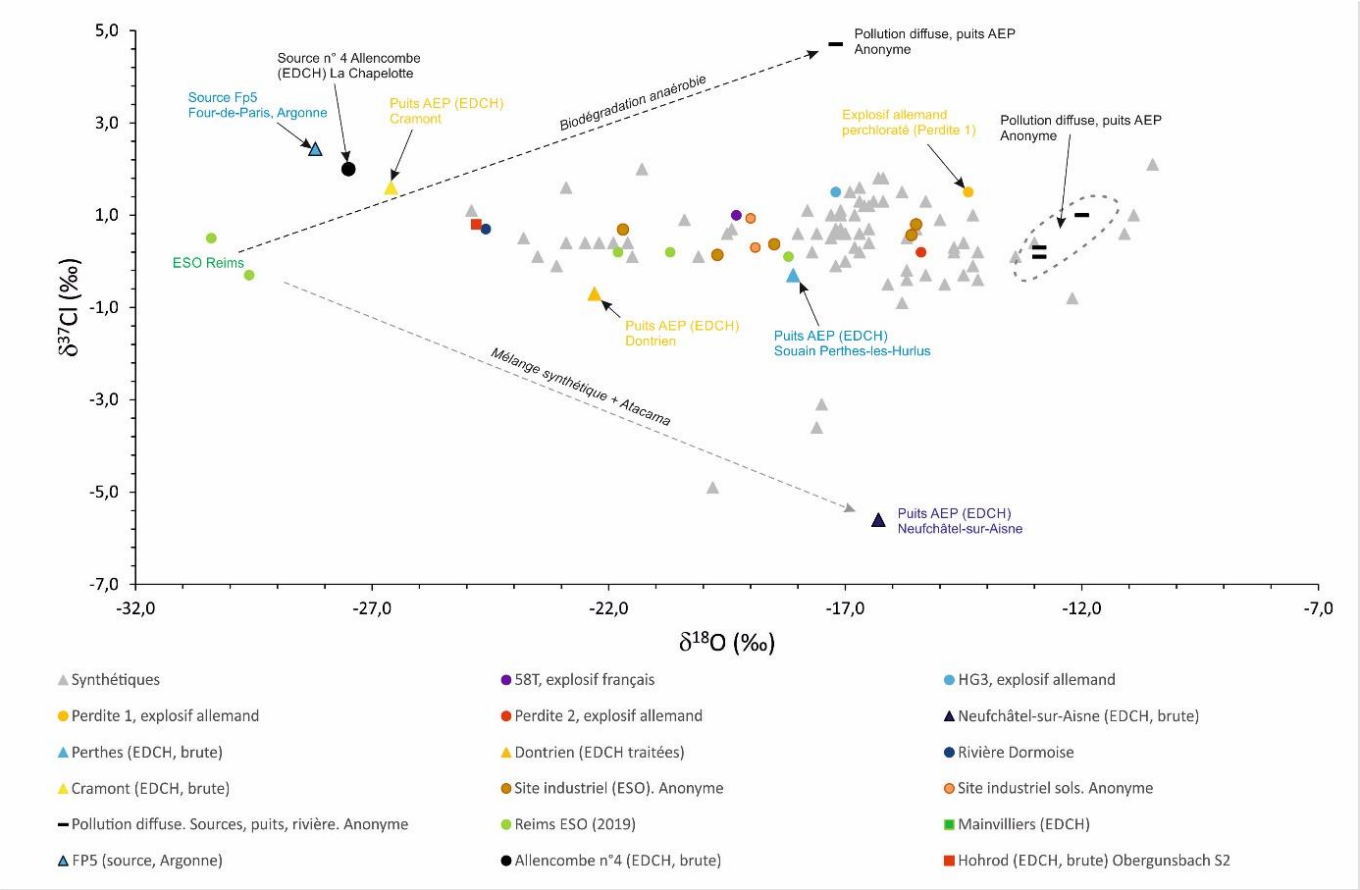


Figure 435 : Résultats $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$, zoom sur le nuage de points des perchlorate de synthèse.

4.2.5 Possibilités et limites du *Fingerprint* isotopique des origines des ions perchlorate dans le contexte historique français. Discussion

Les analyses réalisées démontrent que, localement, les ions perchlorate peuvent être clairement multi sources et multi origines, avec des mélanges d'ions perchlorate de synthèse provenant d'explosifs et d'ions naturels du type Atacama.Si la présence dans les eaux (non javellisées) d'ions chlorate signe une influence de résidus d'explosifs français de 1914-1918, celle d'ions perchlorate possédant une signature isotopique synthétique conduit à une conclusion plus restrictive : il s'agit d'une signature d'explosifs.

Présents dans des formulations d'explosifs explicitement perchloratées (comme l'explosif « P » ou le « *Ch 86 / 14* », cf. Section 1h) ayant systématiquement chargé les projectiles d'artillerie de tranchée français, les explosifs perchloratés sont aussi apparus dans l'Armée allemande à la fin de la guerre comme explosif de secours nitrés nitratés perchloratés pour charger les projectiles d'artillerie de tranchée et les fourneaux de guerre de mines (*Perdite, Perchloratite*, etc.) tandis que les Britanniques n'ont utilisés les sels de perchlorate que de façon totalement anecdotique dans leur artillerie de tranchée (*Sabulite*). Par contre, ces ions perchlorate sont présents de façon inattendue dans certains ergols solides de SAA et dans des explosifs nitrés nitratés standards en impuretés, en particulier dans ceux ayant chargé les grenades à manches allemandes de la fin de la guerre, possédant des compositions atypiques (mélanges complexes de NAC mono-, di, tri-nitrés) possiblement celle de déchets de production du TNT. Une analyse isotopique d'un échantillon (HG3) de cette catégorie d'explosifs a révélé une signature synthétique des ions perchlorate.

Les sels de perchlorate ne furent plus utilisés au chargement des engins explosifs postérieurement à la Grande Guerre mais furent employés dans l'armement dans les blocs propulseurs (ergols solides) des charges militaires autopropulsées (roquettes, missiles).

Les ions perchlorate peuvent donc être présents dans de nombreuses formulations d'explosifs de la Première Guerre mondiale explicitement perchloratées comme de façon fortuite dans des explosifs standards nitrés nitratés et ergols, qu'ils soient allemands ou français. Les approches analytiques et isotopiques visant les seuls ions perchlorate ne permettent pas de discriminer leur nationalité.

Une signature isotopique du type Atacama ne garantit pas une origine agricole des ions perchlorate. En effet, compte tenu de son histoire (i) militaire (usage et destruction massifs de munitions et de matières énergétiques pendant et au terme de la Grande Guerre), (ii) industrielle (production de nitrates et perchlorates de synthèse, usage de nitrates du Chili pour HNO_3 dans la production de NAC) et (ii) agricole (importation et usage de nitrates du Chili) singulière, le *Fingerprint* bipolaire nord-américain (entre perchlorates de synthèse industriels et militaires d'une part et perchlorates naturels d'origine agricole ancienne d'autre part) ne s'avère pas aussi tranché pour les eaux issues du territoire métropolitain.

Ces nitrates chiliens importés pour amender les cultures furent aussi utilisés pour la fabrication de l'acide nitrique (selon la réaction $2\ NaNO_3 + H_2SO_4 \rightarrow 2\ HNO_3 + (Na)_2SO_4$) qui fut historiquement employé pour la synthèse par sulfonitration des explosifs nitrés (NAC) et/ou nitratés (nitrate d'ammonium). La présence d'ions perchlorate naturels chiliens dans les poudres et explosifs nitrés et/ou nitratés anciens est donc probable. Cette source d'azote dont avait tant besoin l'industrie des poudres et explosifs fut exploitée jusque dans l'entre-deux-guerres et fut progressivement délaissée au profit de celle des nitrates synthétiques obtenus par fixation sous pression de l'azote atmosphérique (procédé Haber-Bosch). Ensuite, des nitrates, destinés à la production des poudres et explosifs, ne furent pas uniquement dérivés des nitrates du Chili, mais furent aussi produits par la fixation de l'azote atmosphérique par divers procédés (décrits dans la Section 1h du présent manuscrit), dont le procédé à l'arc électrique Birkeland Eyed. Les conditions reproduites dans un réacteur Birkeland Eyed se rapprochaient de celles rencontrées dans la haute atmosphère où se forment les ions nitrate et perchlorate constituant les salpêtres du Chili. Ainsi, des signatures isotopiques O, Cl de ClO_4^- synthétiques, mais proches ou équivalentes à celles des ions perchlorate naturels du type Atacama, ne peuvent être exclues.

D'autres signatures isotopiques des ions perchlorate qui n'ont pas encore été identifiées à ce jour sont donc probables dans les eaux du territoire métropolitain au regard des éléments historiques énoncés dans ce qui précède.

4.3. *FINGERPRINT* DES COMPOSES NITROAROMATIQUES (NAC) ET DES ISOMERES DU DINITROTOLUENE (DNT).

4.3.1 Généralité et singularité des associations de composés

Les résultats des analyses obtenues à la faveur des campagnes ARS / ANSES nationale et régionale (région Grand'Est) (2020-2022) pour la recherche dans les EDCH des NAC, complétés par ceux issus des études sectorielles dans les Hauts-de-France et en région Grand'Est (2016-2023), montrent l'occurrence, localement, dans les eaux de ces composés à des concentrations pouvant s'avérer élevées (jusqu'à 14 000 $ng.L^{-1}$ pour ∑NAC dans une source à Vauquois (2023)).

Les NAC quantifiés dans les échantillons d'eau forment généralement des cortèges, des mélanges de différentes substances mono-, di- et tri-nitrées.

Les cortèges de NAC présentent une caractéristique commune, celle d'être dominée par l'occurrence des isomères du dinitrotoluène (DNT) et en particulier les 2,6-, 2,3-, 2,4- et 3,4-DNT. Ces cortèges accompagnent les concentrations élevées en ions perchlorate (généralement > 10µgClO_4^-.L^{-1}) sans qu'il y ait de corrélation significative entre les concentrations des deux catégories de composés. Selon les points échantillonnés, les DNT peuvent être accompagnés par des traces de nitrotoluènes (NT), par les dinitrobenzènes (DNB) et les isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT). Le TNT et les isomères des mono-, di- et tri-nitronaphtalènes sont quasiment absents des cortèges (à l'exclusion de ceux mesurés dans les eaux des systèmes de galeries de mine ennoyées). Plus les concentrations en DNT sont élevées, plus grande est la diversité des espèces quantifiées. Certains cortèges sont formés par plus d'une vingtaine de composés nitroraomatiques mono-, di- et tri-nitrés apolaires. Ces cortèges découlant d'analyses au laboratoire peuvent se ranger en trois catégories.

Dans la première, un seul isomère du DNT prédomine parmi les NAC quantifiés comme dans les eaux des sources du champ captant d'Allencombe à La Chapelotte, où le 2,6-DNT est le NAC et l'isomère du DNT dominant, ou encore à Dontrien, où le 2,4-DNT constitue près de 100% des concentrations en NAC quantifiés.

La seconde catégorie de cortèges est celle où un isomère du DNT prédomine parmi la somme des DNT mais est associé à des NAC autres que le DNT. Le 2,4-DNT est associé aux 1,3-DNB et au TNT (et ses sous-produits de transformation environnementale, ADNT et DANT) à des concentrations équivalentes dans les galeries des systèmes profonds de Vauquois est. A Cramont, le 2,6-DNT est le seul isomère du DNT présent, à des concentrations équivalentes à celles du 1,2-DNB.

Enfin, en troisième catégorie, le cas le plus fréquent, est celle de l'association à des concentrations équivalentes de deux isomères du DNT avec en premier chef, celle des 2,3- et 2,6-DNT comme à Neufchâtel-sur-Aisne, Souain Perthes-les-Hurlus, ou encore les sources émanant de la nappe de la Gaize à Vauquois

La composition des cortèges à un point et à un instant donnés est la résultante (i) de la composition initiale de la source (résidus d'explosifs formés de mélanges de substances), (ii) de mécanismes de dissolution différentielle des différents constituants à hauteur de leur hydrosolubilité dans le mélange et (iii) des mécanismes biotiques et abiotiques contrôlant le transfert conservatif ou réactif des différents composés solubles dans la zone non saturée puis la zone saturée (biotransformation), puis (iiii) de processus de sorption différentielle s'opérant lors du transfert des substances en phase dissoute dans le milieu poreux souterrain, et en particulier dans la zone non saturée.

Toutefois, nonobstant cette complexité, la mise en perspective des résultats analytiques avec d'une part (i) l'état des connaissances sur les usages historiques des matières énergétiques durant la Grande Guerre (objet de la Section 1h du présent manuscrit) et d'autre part (ii) le comportement environnemental des composés constituant ces matières (objet de la Section 2h du présent manuscrit), apportent des éléments éclairants quant à l'origine probable des cortèges de composés identifiés par les analyses.

Les 2,4- et 2,6-DNT furent utilisés (i) comme « booster » des poudres propulsives allemandes à base de nitrocellulose, (ii) dans les explosifs allemands ternaires (deux matières énergétiques et un composant inerte comme la sciure de bois) nitrés nitratés comme les *Astralites*, *Altdorfite* et *Trémontite* (à base de nitrate d'ammonium et de TNT) chargeant les grenades à manche, bombes de tranchée, fourneaux de destruction de guerre des mines. Ainsi, le TNT est « *souillé par des composés nitrés inférieurs (dinitrotoluène, dinitrobenzine, mononitrobenzine)*[2079] ». Ces engins ont aussi été chargés par des déchets de production du TNT riches en DNT (cf. Section 1h du volet historique du présent manuscrit). Les DNT pourraient être présents au côté du TNT comme impureté. Le DNT fut produit en Allemagne à hauteur de 67 000 tonnes[2080]. Le 2,4-dinitrotoluène et le 2,6-dinitrotoluène représentent 95% des dinitrotoluènes synthétisés et les 5% restants étaient principalement constitués des quatre autres isomères (2,3-, 2,5-, 3,4- et 3,5-DNT). Les abondances des différents isomères du DNT au sein des explosifs chargeant les projectiles ne sont pas renseignées dans les archives et documents consultés. Le DNT ne figure dans aucune composition d'explosif français et alliés au regard des archives et documents consultés.

Les dinitrobenzènes (DNB) étaient aussi des impuretés apparaissant lors de la synthèse du TNT mais furent aussi sciemment synthétisés et utilisés par les Allemands pour charger certains projectiles (mélanges de 1,2- et 1,3-dinitrobenzène). Ces explosifs de piètre qualité (détonant mal) ne furent pas employés par l'artillerie française et alliée.

DNT et DNB ne dérivent pas de transformations environnementales d'autres molécules plus hautement nitrées (TNT, TNB).

Les isomères de l'ADNT (4-amino-2,6-dinitrotoluène et 2-amino-4,6-dinitrotoluène) ne sont pas présents initialement dans les formulations d'explosifs mais résultent de la biotransformation réductive du TNT (réduction des groupements nitro- (NO_2) en groupements amino- (NH_2)). Leur présence dans les eaux témoigne donc de l'introduction dans les sols de résidus d'explosifs renfermant du TNT.

Des composés mononitrés, comme les isomères des nitrotoluènes et de la nitroaniline ont aussi été ponctuellement quantifiés. Ces composés n'entrent pas dans la formulation des explosifs nitroaromatiques mais correspondent à des impuretés et intermédiaires de synthèse d'autres explosifs di- et tri-nitrés comme le TNT et les dinitronanilines.

Les associations DNT, DNB, TNT / ADNT sont celles majoritairement quantifiées dans les eaux dans le quart nord-est de la France et sont caractéristiques des formulations des explosifs nitrés nitratés allemands utilisés durant la Première Guerre mondiale. Alors que l'occurrence d'ions chlorate est liée à des résidus d'explosifs chloratés français, une fraction (indéfinie) des ions perchlorate mesurés dans ces eaux pourrait aussi provenir de résidus d'explosifs allemands.

4.3.2 *Fingerprint* des isomères du dinitrotoluène

La singularité des signatures chimiques des cortèges de NAC identifiés à la faveur de cette recherche est d'être systématiquement dominées par les isomères des DNT (avec majoritairement les 2,3-DNT, 2,4-DNT et 2,6-DNT en proportions variables selon les secteurs et échantillons (*Fingerprint)*). Le *Fingerprint* des isomères du DNT est discuté dans ce qui suit.

[2079] Bibliothèque nationale de France. *Les explosifs de l'ennemi*.

[2080] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges. Johannes Gutenberg Universität*, *op. cit*. p. 23.

Les solubilités des différents isomères du DNT sont sensiblement identiques. Les DNT possèdent des coefficients de sorption sur les fractions minérales et organiques des sols inférieurs à ceux du TNT. Comme explicité dans le Section 2h du présent manuscrit, les radicaux nitro- agissent comme des groupements attracteurs d'électrons, ce qui favorise leur réduction dans des conditions faiblement réductrices. Par ailleurs, la structure symétrique du 2,4,6-TNT (avec deux groupements nitro- en position ortho- (2,6) et un groupement en position para- (4)) se traduit par une forte attraction électronique par les groupements depuis le noyau benzénique qui présente alors ainsi un déficit en électrons (favorable à la polarisation électrique positive). Le TNT à tendance électropositive se sorbe ainsi au contact des argiles par l'interaction avec les charges négatives des feuillets argileux. Les isomères du DNT sont donc plus mobiles dans les sols et les eaux que le TNT.

Par ailleurs, bien que les K_{ow} des isomères du DNT soient similaires (cf. Tableau 68), il a été démontré que les isomères di-ortho-substitués (comme le 2,6-dinitrotoluène) se sorbent moins que les isomères mono-ortho-substitués (comme le 2,4-dinitrotoluène) (phénomène connu sous le nom « d'ortho-effet »)[2081]. Le 2,6-DNT serait ainsi plus mobile que le 2,4-DNT bien que ce dernier soit plus soluble dans l'eau à 20°C (270 $mg.L^{-1}$ (2,4-DNT) contre 180 $mg.L^{-1}$ (2,6-DNT), et 130 $mg.L^{-1}$ pour le TNT) (cf. Tableau 71). Cette mobilité relative élevée par rapport aux autres isomères du DNT explique possiblement la prévalence dans les eaux de cet isomère par rapport aux autres.

	2,3-DNT	2,4-DNT	2,5-DNT	2,6-DNT	3,4-DNT	3,5-DNT	Unité
Hydrosolubilité	220	270	220	180	100	145	mg/L
Température de mesure de la solubilité	25	22	25	20	25	25	°C
	Estimée US EPA (2011)	ATSDR[2082]	Estimée US EPA (2011)	ATSDR	*Chemicals Inspection Testing Institute 1992*	ATSDR	-
K_{ow}	2,18	1,98	2,18	2,10	2,08	2,02	-
	Estimée US EPA (2011)	ATSDR	Estimée US EPA (2011)	ATSDR	Nakagawa et al. (1992)	ATSDR	-

Tableau 71 : Hydrosolubilités et K_{ow} des isomères du dinitrotoluène (DNT).

Le report dans un diagramme radar des pourcentages des concentrations de chaque isomère du DNT (à l'exception des 2,5-DNT et 3,5-DNT, qui n'ont été que ponctuellement recherchés et qui s'avèrent minoritaires eu égard aux 2,3-, 2,4-, 2,6- et 3,4-DNT) parmi ∑(2,3-, 2,4-, 2,6- et 3,4-DNT) pour 43 points de mesures (cf. Figure 436) montre clairement que la majorité des cortèges sont dominés par les 2,3- et 2,6-DNT. Des échantillons pour lesquels le 2,4-DNT prévaut se détachent : il s'agit des eaux de surface de la Dormoise, du Marson et des eaux des systèmes de galeries profondes ennoyés de l'Argonne et de Vauquois, c'est-à-dire des eaux au sein desquelles les processus de sorption n'opèrent pas aussi significativement que dans le milieu poreux des zones non saturées et des aquifères. Les cortèges d'isomères du DNT diffèrent entre les eaux des galeries à Vauquois (dominés par le 2,4-DNT) et celles, issues de ces systèmes, des sources (dominés par les 2,3- et 2,6-DNT), les effets de sorption différentielle agissant sur l'ensemble des isomères durant le transfert au sein du milieu poreux.

Le *Fingerprint* des DNT dans les eaux pourrait donc être vraisemblablement contrôlé par les différentiels de mobilité (de sorption) entre les isomères et être différent de celui des résidus d'explosifs initialement introduits dans les sols, sachant que sur le plan industriel les DNT intentionnellement produits par l'industrie chimique allemande étaient les 2,4- et 2,6-DNT.

[2081] Joos, A. (2008). KORA, *op. cit.* p.32

[2082] Agency for Toxicological Substances and Diseases Registry (ATSDR). *Toxicological profile for dinitrotoluenes. Chemical and physical informations*. https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp109-c4.pdf.

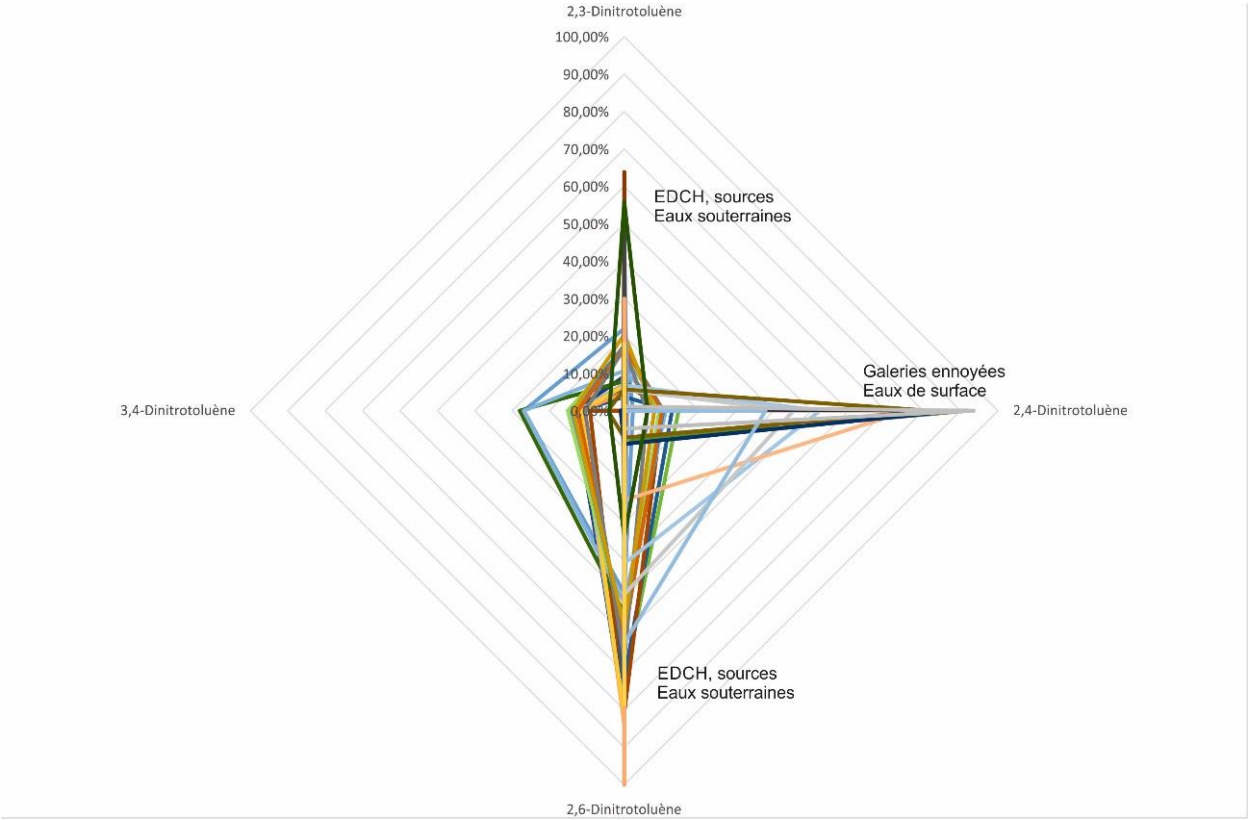


Figure 436 : Distributions des pourcentages relatifs des isomères du DNT dans ∑DNT (n = 43).

4.3.3 Ions chlorate et perchlorate. Des traceurs et indicateurs parfaits des explosifs de la Grande Guerre

Près de 175 000 tonnes de TNT furent produites en Allemagne pour être utilisées entre 1914 et 1918 contre moins de 45 000 tonnes en France (production française et importations des USA) sur la même période[2083]. Le 2,4,6-trinitrophénol (TNP), l'explosif standard réglementaire de l'artillerie française (produit durant la guerre à hauteur de 306 300 tonnes[2084]) fut aussi utilisé par les artillerie allemandes (production de 61 700 tonnes[2085]) et britanniques qui produisirent et importèrent l'équivalent de 250 000 tonnes de TNT et de TNP[2086]. L'Allemagne et la France produisirent donc environ 220 000 tonnes et 368 000 tonnes respectivement de TNT et de TNP. Le tonnage de ces deux NAC s'élève à 838 000 tonnes si y additionne la production britannique. Or, la production en explosifs chlorates et perchlorates de la France durant 1914-1918, le principal producteur et utilisateur de ce type d'explosifs, s'élevait à environ 131 000 tonnes[2087], ce qui ne représentait qu'environ 15% de la production des deux principaux explosifs nitrés. Les tonnages d'explosifs perchlorates produits par les Allemands ne sont pas renseignés dans la documentation consultée à la faveur de cette recherche.

[2083] Bausinger, T. (2011). *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges. Johannes Gutenberg Universität*, *op. cit*, p. 23-24.

[2084] *Ibid*.p.24.

[2085] *Ibid*.p. 23.

[2086] *Ibid.* p. 26.

[2087] *Ibid.* p. 24.

Pourtant le TNT n'a été détecté dans les eaux souterraines qu'à l'état de traces et que très ponctuellement dans le cadre de cette recherche. A l'exclusion des eaux ennoyant les systèmes de galeries profonds de guerre de mines, il n'y eut pour le TNT que deux détections, à Précy-sur-Oise (département de l'Oise) (68 $ng.L^{-1}$ maximum en 2020) et à Vauquois (Fontaine Notre Dame, 128 $ng.L^{-1}$ en juillet 2019). Le TNP n'a pas été détecté, pourtant bien plus soluble dans l'eau (s'agissant d'un composé polaire) que les DNT et TNT. La solubilité dans l'eau à 20°C du TNT est, avec 190 $mg.L^{-1}$[2088] proche de celle des DNT, alors qu'elle s'élève à 14 000 $mg.L^{-1}$ à 20°C pour le TNP[2089].

On retrouve donc de nos jours dans les eaux souterraines non pas les composés produits et utilisés avec les tonnages les plus élevés, à savoir les TNT et TNP, mais les composés dinitrés (DNT, DNB) produits en moindre quantités mais bien plus mobiles dans l'environnement que les NAC trinitrés. Parmi les isomères du DNT, celui majoritairement retrouvé dans les eaux est le plus mobile à savoir le 2,6-DNT. Les différentiels de mobilité entre NAC ne sont pas contrôlés par la solubilité mais par la capacité des sols à retenir les composés par sorption sur les particules solides minérale et organiques. Cette sorption est dépendante de la nature des sols mais aussi des structures moléculaires des composés (stéréochimie). La nature du marquage des eaux par les composés d'origine pyrotechnique ne reflète pas les importances relatives des tonnages des différentes matières énergétiques produites et utilisées durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental mais le comportement environnemental différentiel des constituants des résidus d'explosifs.

Bien que représentant que 1/6e du tonnage ∑TNT, TNP, les ions chlorate et perchlorate sont les composés d'origine pyrotechnique présentant les taux de détection les plus élevés et montrent des concentrations de l'ordre de 10 à 1 00 fois plus élevées que celles de la ∑NAC. L'occurrence dans les eaux d'ions chlorate et perchlorate synthétiques témoignent d'une influence sur les eaux de résidus d'explosifs chloratés et/ou perchloratés datant de la Première Guerre mondiale.

Ces ions sont des composés persistants car ne subissent dans l'environnement (dans les conditions physico-chimiques habituellement rencontrées dans les sols et aquifères) aucune dégradation biotique ou abiotique susceptibles de les transformer ou de les réduire en ions chlorure Cl^-. Par ailleurs, ils n'interagissent quasiment pas avec les particules solides (minérales comme organiques) formant l'ossature des sols et des réservoirs aquifères (absence de sorption). Les sels de chlorate et de perchlorate figurent parmi les sels les plus solubles ce qui leur confère une très grande mobilité au contact des eaux, bien que cette solubilité soit très certainement fortement atténuée par leur association dans les explosifs anciens aux paraffines (hydrophobes). Ces cinétiques de dissolution des explosifs (per)chloratés de la Grande Guerre ne sont pas connues à ce stade des recherches. Contrairement aux NAC, ces ions se comportent comme des traceurs parfaits en migrant dans le milieu souterrain à la même vitesse que l'eau au sein de laquelle ils sont dissouts. ClO_3^- et ClO_4^- constituent donc (i) des indicateurs fiables de l'influence sur les eaux souterraines de résidus d'explosifs caractéristiques de la Première Guerre mondiale introduits dans les sols, (ii) un signal fort que potentiellement ces eaux peuvent être marquées par l'occurrence des NAC les plus mobiles dans l'environnement.

[2088] 2,4,6-Trinitrotoluène. Fiches internationales de sécurité chimique.

[2089] GESTIS Substance Database. Information system on hazardous substances of the German Social Accident Insurance. 2009.

5. Origines et sources des composés d'origine pyrotechnique dans les eaux du quart nord-est de la France.

5.1. ORIGINES ET SOURCES DES COMPOSES D'ORIGINE PYROTECHNIQUE DANS LES EAUX. ENSEIGNEMENTS TIRES DES ETUDES SECTORIELLES

5.1.1 Champ de bataille terrestre et souterrains de l'Argonne et de Vauquois

Les détonations souterraines par centaines à des profondeurs allant jusqu'à 90 m modifièrent artificiellement la structure des formations géologiques dans lesquelles elles furent déclenchées, une roche déjà fracturée, gélive, poreuse, la Gaize du Cénomanien, formant un réservoir aquifère de fissures et de porosité. La fracturation fut accentuée par les effets mécaniques des ondes de compression et de choc liées aux détonations répétées et de plus en plus profondes et puissantes. Cette fracturation provoquée est encore utilisée de nos jours pour accroître la conductivité hydraulique ou à l'huile des terrains pour l'optimisation de la récupération du pétrole ou des échanges thermiques en géothermie profonde. Les modifications apportées à la structure des roches ne se limitèrent pas uniquement à l'extension des fissurations sous contrainte pyrotechnique. De nombreuses galeries furent creusées dans ces roches pour venir placer les charges mais aussi desservir, des chambres « techniques », des abris et casernements souterrains et des dépôts de munitions sécurisés. Avec l'intensification de la guerre de mines, les chantiers s'approfondirent jusqu'à atteindre le toit de la nappe phréatique (vers 60 m à Vauquois et 50 m à la Haute-Chevauchée). Le creusement nécessita alors un pompage d'exhaure pour maintenir ces terrains au sec et permettre une progression et un creusement en toute sécurité. Les terrains aquifères des zones où, le long de la ligne de front stabilisée, l'usage intensif de la mine fut associé aux offensives en surface, doivent être considérés comme des couloirs de fracturation au sein desquels les perméabilités à l'eau furent artificiellement accrues et forment aujourd'hui des axes drainant de circulations préférentielles des eaux souterraines. Ce travail de recherche n'a pas permis de vérifier cette hypothèse par la pose de piézomètres. L'observation des déformations de l'environnement géologique par l'usage de charges explosives enterrées ne fit l'objet d'aucun travail de recherche publié. La puissance des explosions souterraines fut de toute évidence de magnitude géologique. Les néo-aquifères *post-bellum* ne sont plus représentatifs actuellement de ce qu'ils ont été avant-guerre. A la fin de la guerre, lorsque les chantiers souterrains furent abandonnés en 1918, les pompages d'exhaure cessèrent et avec eux le rabattement artificiel de la nappe qui remonta pour atteindre un niveau proche ou égal à son niveau après-guerre, mais à une cote naturelle correspondant aux nouvelles conditions hydrogéologiques (cf. schéma conceptuel de la Figure 437). Cette remontée des eaux ennoya tous le matériel, les munitions et explosifs qui avaient été abandonnés dans les galeries des systèmes profonds.

En Argonne, cette guerre souterraine s'étira sur une longueur inédite sur le front occidental, sur près de 3,5 km entre la Haute-Chevauchée au nord-est jusqu'au Four-de-Paris au sud-ouest sur une croupe topographique délimitée au nord par le Ravin des Meurissons et au sud par le Ravin des Courtes-Chausses. Cette hauteur est encore aujourd'hui complètement bouleversée par des enfilades de vastes entonnoirs coalescents ou isolés. Les eaux de la nappe de la Gaize s'écoulent globalement d'est en ouest, depuis les contreforts de l'Argonne de la vallée de l'Aire vers la vallée de la Biesme (bien que la piézométrie de ce secteur ne soit pas clairement connue). Il est vraisemblable que l'axe nord-est / sud-ouest (Haute-Chevauchée / Four-de-Paris), l'ancien front de guerre de mines, constitue à présent un axe drainant pour les eaux souterraines vers la vallée de la Biesme, et les sources, exutoires vers les eaux de surface de la nappe de la Gaize, situées aux points topographiquement les plus bas, à savoir les sources de la zone du Four-de-Paris.

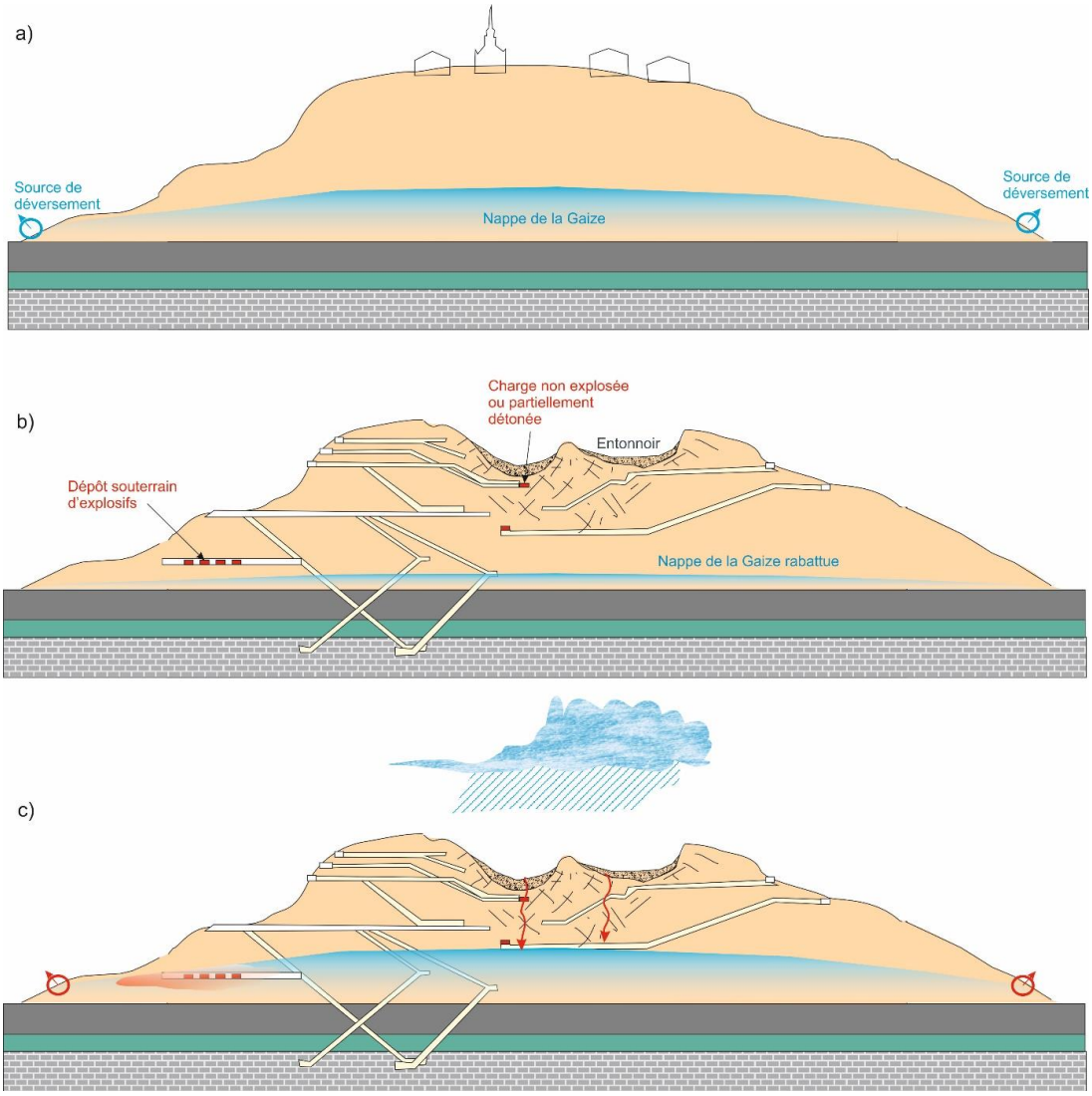


Figure 437 : Schéma conceptuel de transfert de la butte de Vauquois. a) Etat naturel antérieurement à la Première Guerre mondiale avec l'ancien village de Vauquois au sommet, b) situation avec pompage d'exhaure et rabattement durant la guerre de mines, et destruction de la partie sommitale de la butte par les entonnoirs d'explosion. La Gaize est profondément fracturée dans les secteurs minés, c) situation postérieure à 1918, avec arrêt des pompages et ennoyage des systèmes profonds.

L'échantillonnage des sources (non exhaustif) émanant de la nappe de la Gaize en Argonne, le long et de part et d'autre des anciennes lignes de front, en Argonne, comme plus à l'est à Vauquois, pour la recherche des ions perchlorate, chlorate et localement les NAC montrent (i) l'occurrence de concentrations en perchlorate à l'état de traces (< 10 $\mu ClO_4^-.L^{-1}$) et l'absence de quantifications en chlorate (ClO_3^-) en Argonne au sud au-delà des ravins des Courtes-Chausses et au nord des Meurissons, (ii) la présence d'un axe (entre les ravins des Meurissons et des Courtes-Chausses) marqué par de fortes concentrations en ions perchlorate (jusqu'123 $\mu gClO_4$-.L^{-1}) accompagnées par de fortes concentrations en chlorate (jusqu'à 20 $\mu gClO_3$-.L^{-1}) ; (iii) que les plus fortes concentrations ont été mesurées au point topographiquement le plus bas de la ligne de front, au Four-de-Paris, qui fait la jonction entre les escarpements du massif de la Gaize d'Argonne et la nappe d'accompagnement des alluvions de la Biesme. Au regard des écoulements régionaux (d'est en ouest au sein de la nappe de la Gaize), ce secteur du Four-de-Paris, <u>serait l'exutoire de l'aquifère anthropisé de la Gaize.</u>

Il n'existe aucun indice de conditions physico-chimiques anaérobies strictes permettant d'expliquer les concentrations en ions chlorate par la biodégradation des ions perchlorate (eaux bien oxygénées).

Les eaux des galeries profondes de guerre de mines *Teddy, Erda*, A3 et F28 sont marquées à des concentrations variables par des cortèges montrant une très grande diversité de composés mono-, di- et tri-nitrés (TNT) mais dominés par les isomères du DNT et localement (A3, F28) par le 1,3-DNB. Ces NAC n'ont pas été détectés dans les eaux des sources émanant de ces systèmes à l'exclusion de la Fontaine des Courtes Chausses, marquées par les DNT (principalement les 2,3-DNT et 2,6-DNT), et localisée à proximité d'un terrain d'explosion.

A Vauquois, les sources sont marquées par les ions chlorate et en moindre mesure par les ions perchlorate et les NAC (jusqu'à plus de 14 $\mu g.L^{-1}$, avec une prépondérance des isomères du DNT (majoritairement 2,3-DNT, 2,4-DNT et 2,6-DNT), les isomères du DNB (et notamment le 1,3-DNB) avec des concentrations variables selon l'état hydrogéologique du moment du prélèvement. Les isomères des ADNT et des DANT ont aussi été quantifiés attestant de processus de biodégradation réductive affectant le TNT au sein du massif de la Gaize.

En Argonne (secteurs de la Haute Chevauchée, de la Fille Morte) et à Vauquois, les reconnaissances de terrains ont montré l'existence sous terre de dépôts d'explosifs, conditionnés en vrac, exposés aux infiltrations des eaux météoriques, que ce soit en secteur français ou allemand. En surface, des projectiles abandonnés montrent aussi des signes de corrosion avancée de leurs parois, notamment les grenades aux parois fines, corrosion facilitée par les pH acides des sols siliceux développés sur la Gaize. Ainsi, des pollutions concentrées peuvent avoir été générées (i) par des explosifs directement en contact des eaux souterraines dans des galeries profondes à ce jour ennoyées, ou (ii) étant mis en contact des eaux d'infiltration comme observé ; d'autres apports peuvent correspondre à la fraction soluble des chargements des engins qui subissent une corrosion avancée dans les sols. Enfin, l'hypothèse de fragments d'explosifs dispersés dans les sols de surface consécutivement à des détonations de bas-ordre de projectiles d'artillerie ne peut être écarté comme autre contributeur au marquage des eaux par les composés d'origine pyrotechnique. A Vauquois et en Argonne, les archives consultées ne font pas état de fourneaux qui n'aurait pas ou que partiellement fonctionné, même si cette hypothèse ne peut être écartée. L'état de la recherche actuelle ne permet pas de quantifier ces apports de composés d'origine pyrotechnique vers les eaux souterraines.

Les chlorates proviennent des *Cheddites* utilisées pour confectionner les fourneaux de mine français alors que les cortèges de NAC mesurés sont caractéristiques d'explosifs de sureté nitrés nitratés allemands. A Vauquois comme dans le massif de l'Argonne, il n'existe aucun indice de conditions physico-chimiques anaérobies strictes permettant d'expliquer les concentrations en ions chlorate par la biodégradation des ions perchlorate (eaux bien oxygénées). A l'exception des occurrences d'ions chlorate, aucun indice significatif d'influence de matériels énergétiques français n'a pu être mis en évidence. Les ions perchlorate peuvent provenir d'explosifs explicitement perchloratés, qu'ils soient français (grenades et bombes d'artillerie de tranchée) ou allemands (*Perdites*) ou d'impuretés présentes dans les matières énergétiques nitrées nitratées très diverses (ergols, explosifs).

Les eaux des sources mesurées et issues de ces systèmes aquifères anthropisés ne possèdent pas le même chimisme que celui des eaux échantillonnées dans les parties profondes et ennoyées des systèmes de galeries de mine. La première hypothèse serait que les eaux des sources et des galeries ne seraient donc pas en relation directe, montrant qu'il existe une possible hétérogénéité de l'hydrochimie au sein de la nappe de la Gaize selon les différents secteurs de la butte de Vauquois et de l'Argonne.

Cette hétérogénéité pourrait être liée (i) à la complexité des écoulements imposés par la fracturation induite et la géométrie des systèmes de galeries ennoyées (ii) au caractère local, ponctuel et dispersé des sources de pollutions possédant des compositions variables (selon qu'il s'agissent d'explosifs français ou allemands, de dépôts abandonnés, de fourneaux peu ou pas détoné, ou de restes d'explosifs de munitions qui n'ont pas ou partiellement fonctionné). La seconde hypothèse serait celle d'un comportement environnemental différent des composés entre les eaux circulant dans les galeries (hors milieu poreux) et celles s'écoulant dans le milieu poreux et fissuré du massif de la Gaize. Les effets de sorption, inexistants dans les galeries, agiraient lors de l'écoulement de ces eaux dans le massif poreux perméable, retenant les composés et isomères au Kd les plus élevés. Les sources, exutoires de ces systèmes seraient marquées par les composés les moins sorbés.

5.1.2 Champ de bataille terrestre et souterrains de La Chapelotte

En couplant les informations historiques, hydrogéologiques et hydrochimiques, des hypothèses relatives au marquage du champ captant d'Allencombe peuvent être émises.

L'occurrence de composés d'origine pyrotechnique (majoritairement les ions perchlorate possédant une signature synthétique et les isomères du DNT) dans le secteur de La Chapelotte est extrêmement localisée, réduite aux sources du champ captant d'Allencombe. Elles se situent à 1,6 km et au pied du col de La Chapelotte, en aval direct d'une zone ayant connu durant les trois premières années de la Grande Guerre d'intenses et violents combats, en usant dans les deux camps de la tactique de la guerre de mines couplée aux assauts et bombardements en surface.

Les sources du secteur d'étude situées au plus près des anciens champs de bataille et échantillonnées ne sont pas marquées par les ions perchlorate, alors que celles situées à plus d'un kilomètre en contrebas, dans les arrières lignes françaises, le sont. Il paraît peu vraisemblable que le marquage des sources d'Allencombe, à l'écart des zones pilonnées, soit à imputer à la présence dans le proche environnement des sources de résidus d'explosifs introduits dans les sols consécutivement à des tirs défectueux (incidents de tir avec détonation de bas ordre ou absence de détonation (UXO)).

La première particularité du marquage des eaux à Allencombe est celle d'un fort contraste de la chimie de l'eau sur des sources pourtant distantes de quelques dizaines de mètres. Les sources les plus marquées en NAC (sources n°3,4,5) sont majoritairement situées au nord du ruisseau, à l'opposé du col de La Chapelotte. La distribution des concentrations militerait en faveur d'une source de pollution locale proche des sources n°4 et 5.

La seconde particularité des sources d'Allencombe est d'être topographiquement les plus basses du secteur d'étude. L'hypothèse de restes issus de la guerre de mine si intense dans ce secteur peut être posée. On rappelle que le système étagé (six niveaux de galeries) de La Chapelotte est le plus profond de tous les chantiers de guerre de mine recensé sur le front occidental. Les explosions successives ont nécessairement fracturé le Grès vosgiens au cœur de la zone des combats souterrains sur 100 à 120 m de profondeur. Il est vraisemblable que cette colonne fracturée draine *per descensum* des eaux météoriques infiltrées mais aussi celles d'une nappe perchée située à environ 13 m de profondeur depuis le col, décrite dans les archives par les sapeurs-mineurs qui eurent à creuser dans ce secteur. L'altitude de cette nappe perchée coïncide avec celle de la grande majorité des sources identifiées et échantillonnées. L'altitude du système de galeries le plus profond (galerie « *Chevrot* ») coïncide approximativement avec celle des sources d'Allencombe (cf. Figure 438). Les systèmes profonds auraient été dirigés par creusement vers Allencombe.

Les multiples détonations souterraines ont vraisemblablement laissé une fraction indéterminée d'imbrûlés dans la colonne de terrain fracturé. Par ailleurs, les archives montrent qu'au moins un fourneau chargé d'explosif (trois tonnes) n'a pas fonctionné et possiblement est encore enfouis au niveau du cinquième étage du système de galeries. Les eaux infiltrées circulant au sein du couloir fracturé peuvent se retrouver en contact avec les imbrûlés et cette charge et dissoudre les explosifs ou traces d'explosifs perchloratés. Aucune recherche, qu'elle soit historique et/ou environnementale ne porte sur ce que cette guerre souterraine aura légué dans nos sols.

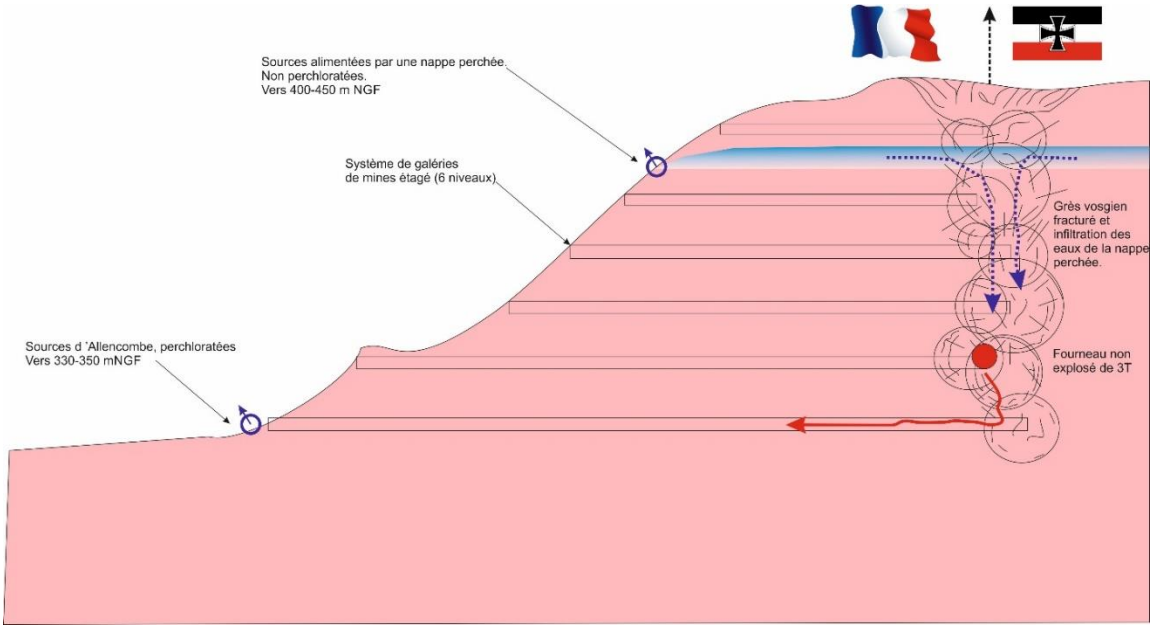


Figure 438 : Schéma conceptuel de transfert des ions perchlorate. Secteur de La Chapelotte. Hypothèse d'une charge non explosée abandonnée.

Mais la nature des cortèges de NAC mesurés à Allencombe vient contredire cette hypothèse. Ces cortèges sont très largement dominés par les isomères du DNT. Le DNT était un constituant typique des explosifs de sureté (comme la *Donarite*, la *Westfalite*, etc.) utilisés par les *Pionniere* allemands pour confectionner les fourneaux de mine, mais chargeaient aussi les grenades et bombes de tranchées. Cette recherche démontre que ces explosifs pouvaient renfermer des ions perchlorate (cf. Section 1h du présent manuscrit). Par ailleurs, la *Perdite* (explosif nitré nitraté perchloraté) a aussi été utilisés vers la fin de la guerre pour la confection des fourneaux de guerre de mine et des chargements de projectiles d'artillerie de tranchée. Toutefois, le fourneau non explosé du cinquième étage était français. Les charges françaises étaient majoritairement confectionnées avec de la *Cheddite* (explosif chloraté) ou de la Dynamite-Gomme.

Or, seuls les ions perchlorate ont été quantifiés à des concentrations stables dans le temps et significatives alors que les ions chlorate n'ont été quantifiés que ponctuellement (sur une autre source que celles perchloratées) à l'état de traces (7 $\mu g ClO_3^-.L^{-1}$) proches de la limite de quantification. La nitroglycérine (NG) n'a pas été détectée dans les eaux des sources. Une charge française oubliée chargée d'explosifs chloratés, ne saurait expliquer la signature chimique mise en évidence en 2017 puis à compter de 2020 par les analyses de l'ANSES.

A Allencombe, les eaux portent une signature d'explosifs ex-allemands. L'observation de la physionomie du terrain à Allencombe montre la présence de vestiges bétonnés, de restes de rails de voies étroites (récupérés par les agriculteurs locaux pour en faire des piquets), et d'une dépression topographique dans l'environnement immédiat du principal captage marqué. En terrain montagneux, rassembler des Restes Explosifs de Guerre aux points les plus bas était aisé, pour les éliminer.

L'origine du marquage des eaux des sources d'Allencombe, d'une part par des ions perchlorate à des concentrations élevées (20-30 µgClO_4^-·L^{-1}) et d'autre part par les NAC (DNT) à des concentrations 100 fois moindres, reste donc incertaine, même si les hypothèses (i) de l'occurrence de résidus d'explosifs dans les couloirs fracturés par la guerre de mines et drainant les eaux, (ii) d'un entonnoir de pétardement proche des sources marquées par les ions perchlorate et les DNT, semblent plausibles.

5.1.3 Secteur de Suippes

Les eaux du captage de Souain seraient sous influence d'écoulements provenant de l'est (cf. SIGES et Figure 422), du camp de Suippes et des anciens champs de bataille de Champagne, incluant, comme en Argonne et à La Chapelotte, une zone de chantiers de guerre de mines ouverts dans des terrains vulnérables, ceux de la Craie. Le captage de Dontrien serait sous influence d'eaux provenant à la fois du secteur du camp de Suippes et de celui de Moronvilliers situé plus à l'ouest, sans qu'il soit possible à ce stade des recherches de faire la part des contributions au chimisme du puits.

Les ions perchlorate présents dans les eaux du captage de Souain Perthes-les-Hurlus et de Dontrien montrent une signature isotopique de perchlorate de synthèse. Les cortèges de NAC sont largement dominés par les isomères du DNT avec à Souain majoritairement les 2,6- et 2,3-DNT alors qu'à Dontrien le 2,4-DNT prévaut largement. Les deux captages sont donc sous influence de deux sources de DNT distinctes et d'explosifs perchloratés.

Le camp de Suippes, ancienne *zone rouge,* accueillait aussi des sites de destruction massive de munitions et explosifs dans l'entre-deux-guerres, puis comme camp militaire actif d'entrainement de l'Artillerie et de l'Aviation continua à être bombardé. Le camp accueille aussi encore les opérations de destruction par pétardement de munitions anciennes collectées par la Sécurité civile. Des matériels explosifs datant des deux guerres mondiales continuent à y être détruits. Les RDX et HMX caractéristiques des formulations des explosifs de la Seconde Guerre mondiale et des explosifs contemporains n'ont pas été détectés à Souain, contrairement à d'autres AEP situé à proximité d'autres camps militaires actifs dans la Marne (Mourmelon) comme dans le sud-ouest de la France.

Le découplage entre la période de production des explosifs et le moment où ils furent introduits dans les sols brouille dans le secteur resté militarisé de Suippes, les liens entre les faits historiques susceptibles d'avoir introduits dans les sols des composés d'origine pyrotechnique et le marquage des eaux souterraines actuellement constaté.

5.1.4 Puits de Neufchâtel-sur-Aisne et de Cramont

Les eaux du puits de Neufchâtel-sur-Aisne

Les eaux du puits AEP de Neufchâtel-sur-Aisne apparaissent très marquées par les ions perchlorate avec d'importantes fluctuations saisonnières des concentrations qui restent, à ce stade des recherche, inexpliquées pouvant être en lien avec les variations des modalités d'exploitation du puits, de la pluviométrie et/ou de la piézométrie (niveau d'eau et/ou directions d'écoulement). Les analyses isotopiques montrent que ces concentrations sont générées par un mélange de perchlorate de synthèse, comme ceux des explosifs explicitement perchloratés, et de perchlorate possédant une signature naturelle comme ceux issus du nitrate du Chili. Les eaux du puits seraient donc possiblement influencées par des sources militaires et agricoles anciennes. Ce puits, localisé dans un environnement encore baloine exploité de nos jours pour la production intensive de la betterave sucrière, n'est pas situé sur les anciennes lignes de front mais dans les arrières lignes allemandes.

Les eaux sont aussi marquées par les NAC parmi lesquels plus de 95% de DNT, majoritairement les isomères 2,6-DNT, 2,3-DNT et 3,4-DNT, des constituants d'explosifs typiquement allemands.

Deux hypothèses peuvent être émises concernant l'origine militaire des ions perchlorate et de ces DNT.

La première serait celle d'une source de pollution proximale, générée par un ou plusieurs sites de destruction des dépôts ex-allemands, Neufchâtel étant située dans les arrières lignes allemandes où étaient stockées les munitions. Aucune archive ou photographie aérienne ancienne ne permettent de conforter cette hypothèse.

La seconde hypothèse est celle d'un marquage distal par une source éloignée mais concentrée située plus au nord si on considère les écoulements régionaux au sein de la nappe de la Craie (cf. Figure 429). Ce secteur du sud du département de l'Aisne fut historiquement marqué (i) par les combats durant toute la durée de la guerre, puis (ii) par la démolition industrielle de tonnages très importants de Restes Explosifs de Guerre rassemblés pour y être neutralisés dans l'actuel camp de Sissonne et ses abords. Une usine de destruction de munitions fonctionna à Joeffrecourt, F.N. Pickett y installa des chantiers. Les quantités étaient en 1920 telles que le centre de rassemblement de Sissonne fut saturé.

Les eaux du puits de Cramont

La qualité des eaux du puits de Cramont, dans la Somme, est dégradée par des ions perchlorate montrant une signature isotopique de synthèse, associés à un cortège de NAC (mélange de DNT, DNB, ADNT (ex-TNT)). Ces composés sont issus de résidus d'explosifs caractéristiques de la Première Guerre mondiale. Les DNT et DNB signent pour ces résidus, une origine allemande.

Situé à 45 km au nord-ouest des anciennes lignes de front et en aval direct des anciens chantiers de désobusage des entreprises Armes Georges & Co et Bowen (avant 1920) puis F.N. Pickett & Fils (après 1920), le cas du site de Cramont apporte une preuve irréfutable que les sites de destruction de munitions et des REG, exploités dans l'entre-deux-guerres, contribuent à dégrader la qualité des eaux souterraines par des composés énergétiques notamment utilisés dans les chargements des projectiles d'artillerie ou dans les charges de destruction. Se dessine, au regard des mesures effectuées par l'ARS en 2013 (cf. Figure 433), un panache d'ions perchlorate, ancré et alimenté par une zone source coïncidant vraisemblablement avec le terrain d'explosion (à ce jour remblayé) de Conteville, puis s'étendant selon le sens des écoulements de la nappe de la Craie vers l'ouest-sud-ouest. Ces ions sont vraisemblablement accompagnés sur leur trajectoire par les NAC qui, contrairement aux ions ClO_4^- au comportement conservatif de traceur parfait, sont rapidement atténués par les mécanismes de sorption et de dispersion / dilution compte tenu des faibles concentrations observées en aval de la zone source (d'un facteur 100 environ moindres que celles des ClO_4^-). De tels panaches s'apparentent à ceux couramment rencontrés en présence de zones sources de pollution concentrées d'origine industrielle (l'activité industrielle ici en cause étant celle de la liquidation des REG de 1914-1918).

5.2. LA GRANDE GUERRE ET LA SORTIE DE GUERRE DANS LES EAUX DU QUART NORD-EST DE LA FRANCE

Les recherches historiques ainsi que les résultats des études sectorielles exposés dans ce manuscrit mettent en exergue deux situations susceptibles d'être à l'origine de zones de pollution concentrées par des composés d'origine pyrotechniques. Ces zones sont générées par l'introduction dans les sols, sur des aires géographiques restreintes, de fortes masses de résidus d'explosifs. Les composés constituant ces résidus se présentent alors dans les sols avec de fortes teneurs (exprimées en mg/kg MS). Ces zones d'accumulation de résidus d'origine pyrotechnique, si elles sont exposées aux eaux (souterraines et/ou météoriques infiltrées), constituent des sources de pollution susceptibles de dégrader durablement les eaux souterraines sur de larges secteurs géographiques par des concentrations pouvant être élevées selon les composés et leur solubilité.

La première est celle des zones de guerre de mines, où de grandes quantités d'explosifs (parfois se chiffrant à plusieurs centaines de tonnes) furent stockées puis utilisées pour confectionner les fourneaux de destruction offensifs et défensifs. Les taux d'imbrûlés consécutifs aux détonations souterraines ne sont pas connus tout comme le nombre exact de charges non explosées et abandonnées suite à leur dysfonctionnement. Cette recherche montre aussi que ces chantiers chtoniens furent principalement exploités entre 1915 et 1917, puis furent abandonnés en 1918, en laissant dans les galeries de grandes quantités de munitions et d'explosifs. Par ailleurs, ces zones de guerre de mines se développèrent sur des secteurs stratégiques, très localisés (quelques hectares à quelques centaines d'hectares) et très disputés du front (cf. Figure 439). Les combats impliquant en général l'Artillerie (notamment celle de tranchée pour les combats rapprochés) s'y déroulèrent aussi en surface. Les détonations de bas-ordre de ces projectiles ainsi que les UXO non explosés et en cours de corrosion avancée peuvent aussi contribuer depuis la surface à l'introduction dans les sols des résidus d'explosifs. L'intense fracturation générée par les multiples détonations souterraines favorise l'infiltration et les circulations préférentielles d'eau précisément dans les terres marquées par les imbrûlés et la présence éventuelle de charges dysfonctionnelles abandonnées. Des explosifs conditionnés dans de simples papiers paraffinés, dans des caisses en bois ou dans des sacs de toile de jute peuvent aussi se retrouver directement au contact des eaux souterraines là où ces explosifs furent abandonnés dans des systèmes profonds dont le creusement nécessita des pompages d'exhaure. Enfin, certains entonnoirs furent exploités dans l'immédiate sortie de guerre pour détruire par éclatement (Open Detonation) les Restes Explosifs de Guerre collectés sur ces secteurs. Des terrains d'explosion furent aussi ouverts et exploités pour ces opérations, comme en Argonne (Courtes Chausses) ou encore à Berry-au-Bac (Cote 108) à l'extrémité est du Chemin des Dames (département de l'Aisne) (cf. Figure 440).

Cet environnement hydrogéologique localement fortement anthropisé ainsi que la présence de masses considérables d'explosifs directement exposées aux conditions environnementales forment un terreau très favorable à la genèse de pollutions des eaux souterraines durables et concentrées.

(i) Les ions chlorate (de la *Cheddite*), la nitroglycérine (de la *Dynamite-Gomme*) ainsi que les ions perchlorate (avec un signature isotopique Atacama) (de la poudre noire) peuvent provenir de fourneaux français, (ii) l'aluminium, les ions nitrate et ammonium (de l'*Ammonal*) de fourneaux britanniques. L'empreinte des explosifs allemands constituant les fourneaux de mine est caractérisée par le TNT (et les isomères des ADNT qui en découlent), les isomères du DNT, les impuretés des DNT et TNT (des explosifs de sureté et des *Perdites*) ainsi que par les ions perchlorate (avec une signature isotopique synthétique) (des *Perdites*).

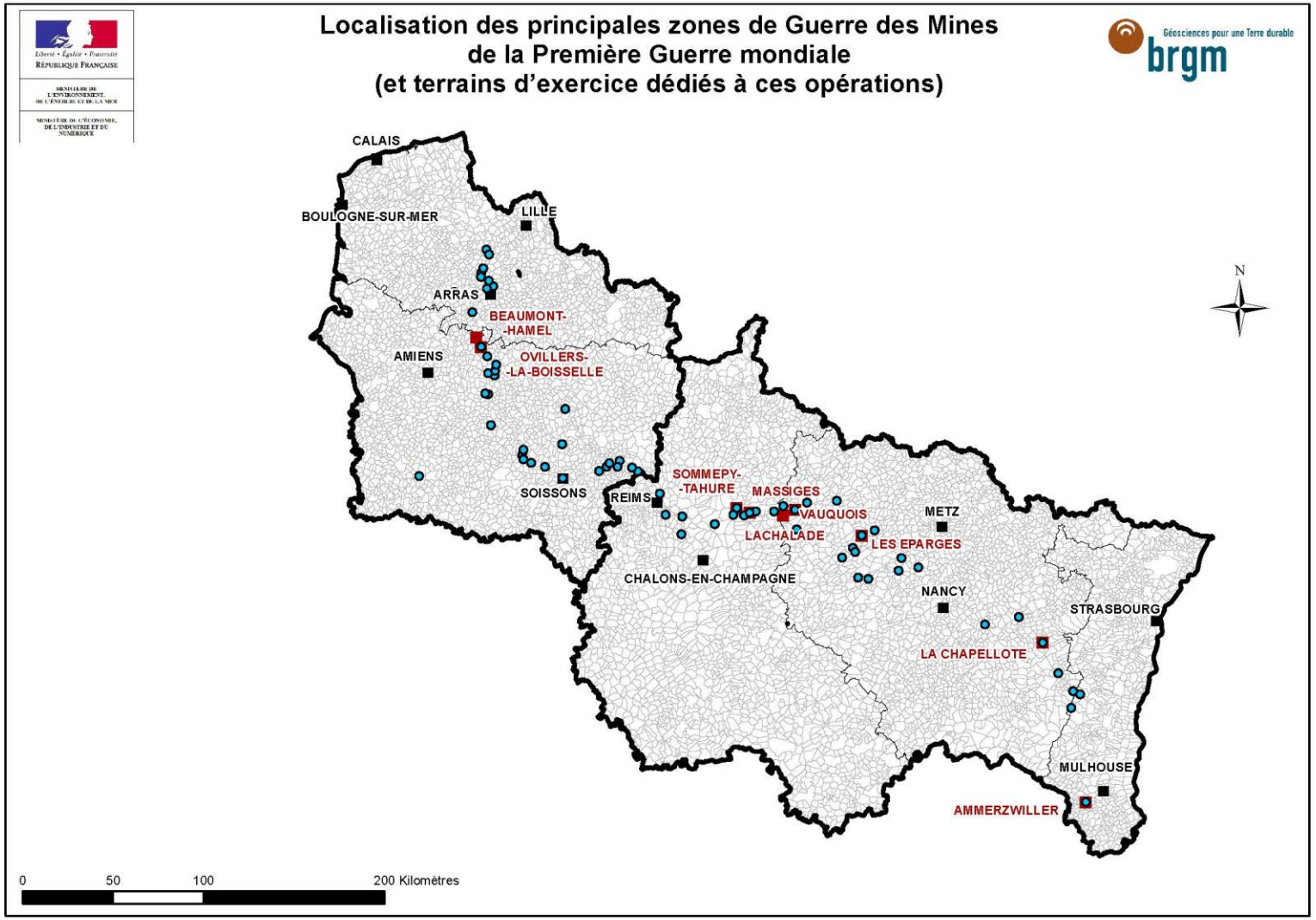


Figure 439 : Cartographie des secteurs de guerre de mines (en rouge, quelques hauts lieux de la guerre de mines).

Figure 440 : Site de la guerre de mines et terrains d'explosion de la Cote 108 à Berry-au-Bac (département de l'Aisne)[2090].

La seconde situation est celle des centres de destructions des Restes Explosifs de Guerre et des surplus de l'Artillerie. En effet durant la guerre et surtout durant l'immédiate sortie de guerre, dès novembre 1918, des consignes furent passées par le GQG aux Généraux commandant les Parcs d'Artillerie Régionaux des 1er, 2e, 6e, 7e et 20e Régions militaires afin de faire procéder à la récupération des matières et matériels explosibles des munitions éparses, tirées (UXO) ou non utilisées, qu'elles soient françaises, alliées ou encore allemandes, abandonnés au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Les amas de munitions désorganisées ainsi que les petits dépôts avancés furent aussi récupérés. Les matériels transportables furent dirigés vers de centre (dépôts) de rassemblement, tandis que les engins jugés intransportables étaient neutralisés sur place par pétardement (*Blown-in-Place*) par les artificiers. Les matières explosibles initialement dispersées se retrouvèrent ainsi concentrées sur une aire géographique restreinte.

[2090] Extrait du cliché IGNF_PVA_1-0__1929-09-05__C2711-0101_1929_NP7_2124. Imagerie LiDAR : communication personnelle.

Ces mécanismes de rassemblement et d'accumulation de masses, initialement dispersées sur de vastes secteurs géographiques, sur des zones d'extension très restreinte génèrent des situations où sont rassemblées les conditions pouvant déboucher sur la formation de zones de pollution concentrées, si ces masses sont déconfinées, extraites de leurs contenants, et introduites dans les sols (cf. Figure 441). Dans le cas des REG, ceci s'opère lors des destructions des engins par *Open Detonation* (OD) en masse

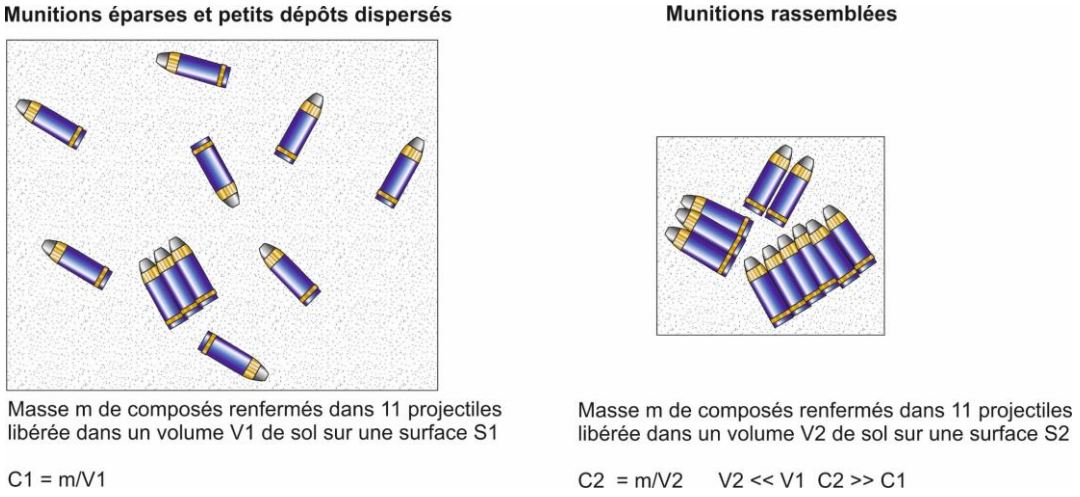


Figure 441 : Rassemblement de Restes Explosifs de Guerre et concentration des masses de composés.

Tout ou partie des dépôts et centres de rassemblement furent liquidés, notamment par l'ouverture et l'exploitation de terrains d'explosion généralement installés à proximité des stocks à détruire. Ces destructions menées à une échelle industrielle dans l'entre-deux-guerres, furent opérées par pétardement en masse (OD) de fourneaux de matériels et matières explosibles. Certains terrains d'explosion éliminèrent des centaines voire des milliers de tonnes de REG. Les retours d'expérience étrangers ainsi que les études originales exposés dans le présent manuscrit (cf. Section 3e) montrent que cette pratique de destruction de munitions obsolètes, hors services, en surplus est polluante. Durant la détonation provoquée des fourneaux, les engins suivent notamment un régime de détonation par sympathie de bas-ordre libérant dans les sols des quantités très variables de fragments millimétriques (*flakes*) à centimétriques (*chunks*) d'explosifs qui ne se dissolvent que lentement au contact des eaux météoriques et peuvent constituer des sources pérennes de composés dégradant durablement les eaux souterraines. D'autres engins ne détonent pas du tout, mais s'écrasent, se déforment, se fracturent, exposant leur chargement à l'environnement. Ces engins endommagés peuvent alors subir une corrosion facilitée et accélérée qui, avec le temps (selon les conditions environnementales, la qualité des aciers et l'épaisseur des casings) conduit à la perte de tout ou partie de leur intégrité et exposant ainsi de façon différée leur chargement à l'environnement. Fragments d'explosifs et de munitions se concentrent ainsi au cœur et à la base des entonnoirs d'explosion (cf. Section 3e), mais aussi dans les matériaux utilisés pour les remblayer, provenant généralement des auréoles de projection.

Le site de Cramont Conteville apporte une preuve irréfutable que ces sites de destruction contribuent au marquage perchloraté des eaux souterraines par des ions perchlorate (de synthèse) issus des explosifs, accompagnés par des NAC dont la nature dépend des explosifs et munitions pétardés et de leur comportement environnemental.

Le report des localisations des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans le cadre de l'inventaire national du BRGM (parmi lesquels une majorité de sites de destruction par OD) dans les grandes régions Hauts-de-France et Grand 'Est sur la carte de distribution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH (2011-2015) montre que l'empreinte perchloratée des eaux est bien mieux géographiquement corrélée à la répartition des sites de destruction de REG qu'aux anciennes lignes du front occidental. Les sites de destruction et les EDCH marquées par les ions perchlorate sont majoritairement localisés à l'est de ces lignes dans ce qui était les zones des étapes et des armées d'occupation allemande, là où étaient situés les dépôts allemands que les troupes du *Reich* abandonnèrent en 1918 lors de leur retraite.

Trois points apparaissent particulièrement éclairants à ce stade de la réflexion (i) les munitions ex-allemandes furent rassemblées par les armées françaises et alliées dans l'immédiates sortie de guerre, pour être réservées puis systématiquement détruites (contrairement aux engins français et alliés), ce qui signifie qu'un grand nombre (inconnu) de terrain de destruction démolirent des matériels et matières explosibles de confection allemande, (ii) les cortèges de NAC caractérisés par les campagnes ANSES de recherche des résidus d'explosifs (2020-2022) et à la faveur des études sectorielles approfondies sont dominés par des composés entrant dans les formulation d'explosifs typiquement allemands (DNT, DNB, TNN). Enfin, la majorité des *Burning Grounds* identifiés et caractérisés visaient des matériels ex-allemands caractéristiques de la fin de la guerre. L'hypothèse selon laquelle les BG seraient avant tout une spécificité liée à la neutralisation des engins ex-allemands est réaliste. Cette recherche démontre que ces sites sont rares, isolés et d'extension très limitée et que les polluants qui s'y concentrent sont peu ou pas mobiles.

Dans les secteurs non concernés par la guerre de mines et les destructions massives de REG, des composés d'origine pyrotechniques, de nature et en quantités susceptibles de dégrader durablement la qualité des eaux souterraines, ont pu être introduits dans les sols à la faveur de tirs de l'Artillerie, en particulier dans les secteurs intensément pilonnés. Le nombre de projectiles déflagrés (détonation de bas-ordre) ou restés inertes (UXO) introduits dans les sols consécutivement à des tirs est directement proportionnel aux quantités tirées et serait de l'ordre de 25% des engins vectorisés. Cette recherche montre (cf. Section 1e du présent manuscrit) que ces projectiles dysfonctionnels peuvent être des pourvoyeurs de composés d'origine pyrotechniques dans les sols en exposant instantanément (après déflagration) ou de façon différée (après une phase de corrosion des *casings* pouvant exiger des centaines d'années) tout ou partie de leur chargement à l'environnement. (i) Les engins épars et isolés détruits par pétardement, (ii) les projectiles tirés et déflagrés et (iii) les projectiles tirés et non explosés sont possiblement à l'origine d'un marquage diffus des eaux souterraines par les ions perchlorate et les autres composés d'origine pyrotechnique à des concentrations moindres que celles constatées dans les secteurs de guerre de mines et de destruction massive des REG.

L'empreinte perchloratée et pyrotechnique des eaux souterraines dans le quart nord-est de la France apparaît donc majoritairement allemande et liée aux pratiques guerrières et à la démilitarisation des sols dans la sortie de guerre. Elle est une résultante de (i) l'usage et/ou à l'abandon durant la Première Guerre mondiale par les armées en campagne de quantités considérables (par centaines de milliers de tonnes) de matériels et de matières explosibles, en particulier dans les secteurs de guerre de mines fortement disputés, mais aussi (ii) des destructions à des échelles industrielles de quantités considérables de Restes Explosifs de Guerre et surplus d'engins obsolètes, en particulier ex-allemands dans l'entre-deux-guerres. Des sites hybrides où les sites de guerre de mine et de destruction de Restes Explosifs de Guerre ont aussi été identifiés. Ces ions perchlorate, très mobiles et persistants dans les eaux, peuvent être issus de la dissolution de résidus d'explosifs d'une grande diversité introduits dans les sols et/ou le milieu souterrain, mais aussi provenir en partie (dans des proportions impossibles à estimer dans l'état actuel des connaissances) de terrains où ils purent s'emmagasiner consécutivement à l'usage de nitrates du Chili naturellement perchloratés notamment importés comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière dans le nord de la France.

Cette recherche originale, menée aux interfaces poreuses entre histoire environnementale et militaire et les géosciences, apporte la démonstration que la brutalisation environnementale qui accompagne les guerres modernes, moments paroxystiques courts mais d'une extrême violence, marque durablement les sols et les eaux.

La Grande Guerre industrielle déboucha sur un après-guerre industriel plus polluant encore que la guerre. Le nettoyage en quelques années des anciens champs de bataille et les opérations de remise en état des sols se traduisirent par une dégradation durable et locale des sols (sites de destruction de REG) qui impacte à des échelles plus étendues, régionales, la qualité des eaux souterraines par les composés les plus mobiles et les plus persistants présents dans les résidus d'explosifs. L'empreinte déjà centenaire de la guerre et de la sortie de guerre industrielles persistera sur des échelles de temps sans commune mesure avec celle des évènements l'ayant généré

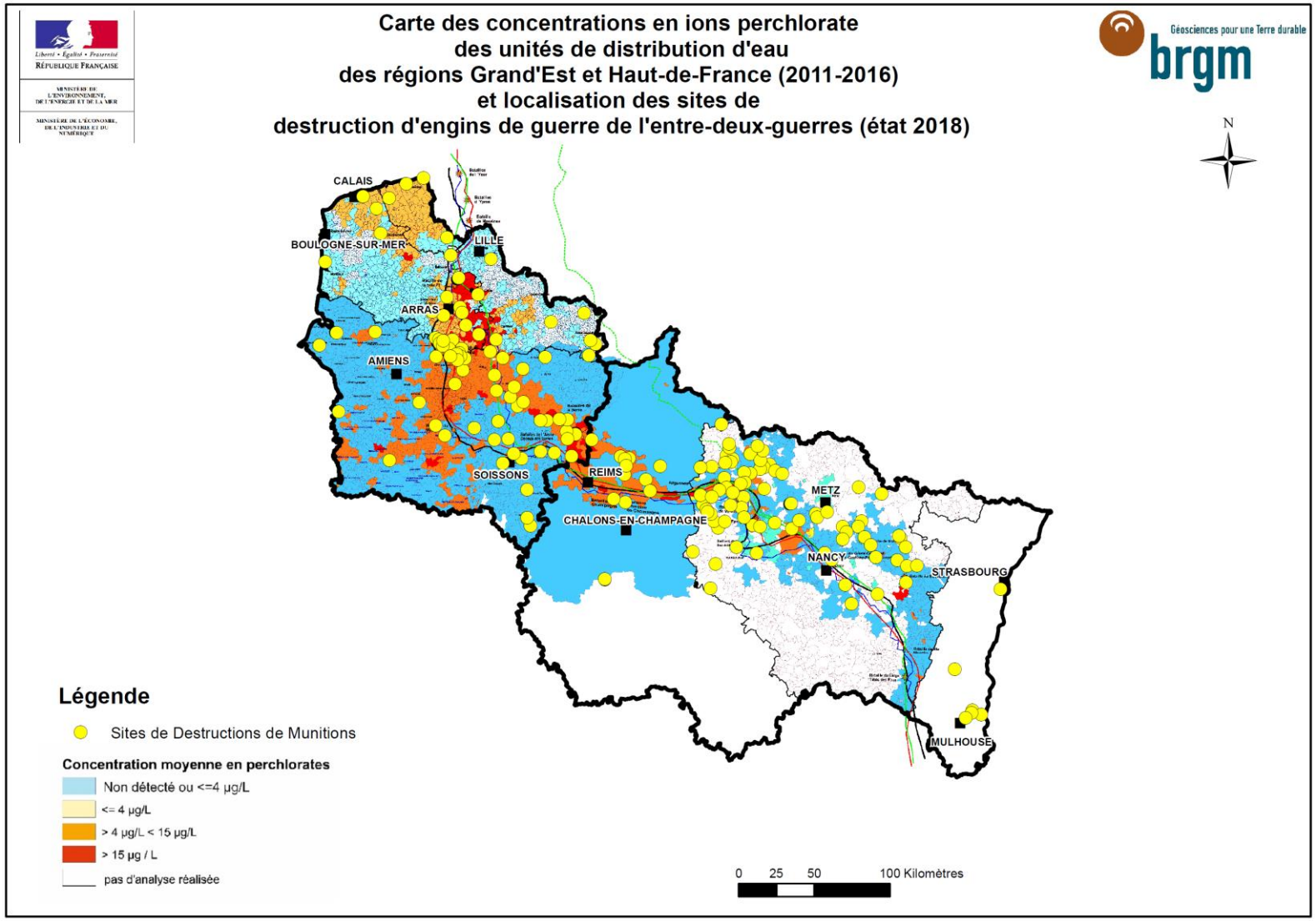


Figure 442 : Présence d'ions perchlorate dans les EDCH des grandes régions Hauts-de-France et Grand'Est (2011-2016) et localisation des anciennes lignes du front occidental et des sites de destruction de Restes Explosifs de Guerre (BRGM, 2018).

6. Résumé et conclusions de la Section 4e

L'ANSES (agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) organisa et pilota, entre 2020 et 2022, une campagne nationale exploratoire et une campagne régionale (en région Grand'Est) de recherche des constituant des explosifs dans les EDCH (Eaux Destinées à la Consommation Humaine) dans le cadre de ses missions d'amélioration de l'état des connaissances des polluants émergents susceptibles d'être présents dans ces eaux. L'ANSES considéra que les ions perchlorate identifiés dans les EDCH par les ARS (entre 2011 et 2015), en particulier dans le quart nord-est de la France, pouvaient avoir une origine militaire historique, notamment en lien avec les poudres et explosifs de la Grande Guerre et être accompagnés par un cortège d'autres composés constituant ces matières énergétiques. En effet, durant le conflit de 1914-1918, les explosifs explicitement perchloratés ne constituèrent que moins de 1/5e du tonnage total de matières énergétiques produites et utilisées sur le front occidental.

Un important effort de développement analytique fut entrepris par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES pour pouvoir doser (à des concentrations de l'ordre du ng.L^{-1} à la centaine de ng.L^{-l} selon les composés) les autres composés, organiques nitrés, entrant dans les formulations typiques des ergols solides et des explosifs de la Grande Guerre. Une liste analytique de plus de 50 composés fut établie rassemblant les composés énergétiques primaires mais aussi leurs stabilisants, impuretés et sous-produits de transformation environnementale. Les toxiques de guerre et leurs dérivés ne furent pas intégrés à cette liste. Une recherche de ces composés fut entreprise au niveau national visant les EDCH sélectionnées selon un protocole appliqué par l'ANSES à chaque campagne nationale exploratoire visant des substances émergentes. La densité de l'échantillonnage (trois captages par département) fut renforcée par environ 80 points en région Grand'Est conformément aux objectifs du PRSE 3 (Plan Régional Santé Environnement n°3). L'échantillonnage visait les eaux brutes comme les eaux traitées.

L'échantillonnage des EDCH à grande échelle n'est pas nécessairement représentatif de la qualité réelle de la ressource en eau du fait (i) des traitements de potabilisation des eaux brutes, et (ii) des conditions d'exploitation des forages (avec mélanges des eaux, etc.). Par ailleurs, cette faible densité de points de mesure à l'échelle des territoires concernés ne permet pas d'effectuer les croisements nécessaires entre le marquage des eaux et les faits et évènements historiques susceptibles d'avoir introduits ces substances dans les sols puis dans les eaux souterraines. Aussi, afin de pouvoir préciser les relations entre faits et pratiques polluantes historiques et leurs impacts actuels sur les eaux, des études détaillées approfondies furent menées dans des secteurs particuliers du quart nord-est de la France, sélectionnés sur des critères (i) historiques (positions et typologie des combats de 1914-1918 et/ou destructions de Restes Explosifs de Guerre de l'entre-deux-guerres, etc.), (ii) environnementaux (marquage des eaux par les ions perchlorate, connaissance des écoulements des eaux, etc.) et (iii) de facilité d'accès aux eaux souterraines et de surface. Trois secteurs ont été retenus car n'ayant jamais connu avant comme après-guerre d'autres activités anthropiques potentiellement polluantes que les combats de la Grande Guerre : il s'agit des secteurs forestiers sanctuarisés du massif des Vosges (Lingekopf (département du Haut-Rhin), La Chapelotte (département de la Meurthe-et-Moselle)) et de l'Argonne (incluant la butte de Vauquois) (départements de la Marne et de la Meuse). Ces secteurs offrent les meilleures perspectives d'identifier un *Fingerprint* spécifique aux éventuelles pollutions des eaux héritées de la Grande Guerre.

Les autres secteurs sont (i) le front de Champagne (secteur du camp militaire actif de Suippes, anciennement *zone rouge*, département de la Marne), comprenant notamment les captages AEP de Dontrien et de Souain Perthes-les-Hurlus, les eaux superficielles de la Dormoise et du Marson (ii) le captage AEP de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne), et enfin (iii) le captage AEP de Cramont. Le captage de Cramont présente la particularité d'être éloigné de près de 50 km au nord-ouest du front de la Somme (en secteur britannique). Ces recherches non exhaustives et perfectibles, furent menées avec les moyens techniques et financiers alors disponibles.

Furent échantillonnés, selon les secteurs, (i) des eaux de surface (secteur de Suippes), (ii) des eaux issues de sources non captées, (iii) des eaux provenant de sources AEP captées (Linge, La Chapelotte), (iiii) des eaux ennoyant des systèmes de galeries profondes de guerre de mines (Argonne, Vauquois) et (iiiii) les eaux brutes et les eaux traitées de forages AEP (Cramont, Souain Perthes-les-Hurlus, Dontrien, Neufchâtel-sur-Aisne). Le programme analytique fut adapté aux spécificités de chaque secteur mais furent systématiquement recherchés au laboratoire (i) les ions chlorate et perchlorate, (ii) les ions nitrate et ammonium, (iii) les composés nitroaromatiques (NAC) selon la liste et les protocoles analytiques du LHN.

L'Argonne (dont Vauquois) constitue, avec plus de 70 échantillons collectés, le secteur où les recherches furent menées au plus haut niveau de détail. Ponctuellement, les cations et anions majeurs ont aussi été recherchés ainsi que les NAC par laboratoire Envilytix puis par le LHN. Des explorations archéologiques et spéléologiques furent enfin menées dans des souterrains de combat de l'Argonne et de Vauquois pour (i) observer l'état physique de la Gaize, (ii) échantillonner les eaux souterraines ennoyant les systèmes profonds et (iii) échantillonner les matériaux énergétiques ou pollués par ces derniers.

Un échantillonnage visant spécifiquement et sélectivement les ions perchlorate dans les eaux montrant les concentrations en ClO_4^- les plus élevées a été réalisée dans les secteurs d'étude du massif de Vosges (Lingekopf et La Chapelotte), de l'Argonne, de Champagne, de Cramont et de Neufchâtel-sur-Aisne au moyen d'un protocole opératoire original (piégeage et enrichissement sélectif d'une colonne de résine échangeuse d'ions en ClO_4^-), pour l'analyse au laboratoire (Delaware, USA) des abondances des isotopes stables de l'oxygène et du chlore au sein de ClO_4^- ·L'objectif de cette démarche de *Forensie* environnementale[2091] est de pouvoir discriminer les origines des ions perchlorate avec d'une part les ions anthropiques et synthétiques (pour la production d'explosifs) et d'autre part les ions naturels, présents les engrais à base de nitrates perchloratés du Chili (type Atacama) massivement utilisés pour la culture intensive de la betterave sucrière dans le nord de la France. Les secteurs de Suippes, Cramont et Neufchâtel sont situés dans des zones agricoles traditionnellement dédiées à la culture de la betterave. Ces mesures ont été environnées par des mesures effectuées (i) sur des eaux marquées en France et à l'étranger par des pollutions en ClO_4^- concentrées (industrielles) et diffuses, (ii) sur des sols fortement pollués en ClO_4^-, (iii) sur des effluents d'électrosynthèse actuels des $NaClO_3$ et $NaClO_4$, (iiii) sur des explosifs français et allemands datant de la Grande Guerre, ces données ont été complétées par un vaste jeu de données issues des travaux de recherche de Neil Sturchio concernant (i) des perchlorates de synthèse (ii) des perchlorates naturels de type Atacama, et (iii) des perchlorates naturels provenant d'autres zones arides de par le monde. Les eaux perchloratées d'un captage AEP situé dans le département du Loiret, en zone betteravière, ont aussi été échantillonnées et analysée selon les protocoles opératoires appliquées aux eaux des études sectorielles.

L'histoire de chacun de ces secteurs durant la Grande Guerre et la sortie de guerre a été précisée en identifier ce qui fit pour chacun d'entre eux leur spécificité.

[2091] Recherches et outils permettant de déterminer l'origine et/ou la datation des pollutions environnementales.

Trois secteurs constituent des hauts lieux de la guerre souterraine de mines sur le front occidental de par son étendue (Argonne), intensité (Vauquois) et profondeur (La Chapelotte). Une zone de guerre de mines est aussi située à quelques kilomètres de Souin Perthes-les-Hurlus (à proximité du village détruit du même nom). Les centaines de détonations souterraines et des dizaines de kilomètres de galeries parfois profondes (à plus de 50 m de profondeur) ont profondément bouleversé et fracturé les terrains (Gaize d'Argonne et Grès vosgien), modifiant par cette entremise définitivement les propriétés de conductivité hydraulique des terrains (anthropisation du réservoir aquifère de la Gaize notamment). Les creusements profonds furent rendus possibles en Argonne et à Vauquois par des pompages d'exhaure (de rabattement). La guerre de mines y fut particulièrement active entre 1915 et 1917, puis déclina. Les systèmes de galeries profonds s'ennoyèrent naturellement dès 1918 lors de l'abandon des chantiers souterrains et des pompages. Allemands comme Français abandonnèrent dans ces systèmes de grandes quantités d'explosifs en vrac, des munitions en tous genres et des charges d'autodestruction. En Argonne, charnière entre deux secteurs très actifs du front (front de Champagne à l'ouest et celui de Verdun à l'est), comme à La Chapelotte (secteur prisé par les Allemands, dont la prise devait leur ouvrir la voie vers la plaine de Lorraine) ou encore au Lingekopf, les combats furent particulièrement violents en 1915 afin d'espérer reprendre la guerre de mouvement. La guerre souterraine se combina à une guerre en surface, aux assauts d'infanterie soutenus par l'Artillerie.

Le secteur de Suippes possède un historique complexe. Le front de Champagne fut actif durant toute la guerre. Y fut inauguré en 1915 les bombardements massifs de préparation des assauts. Les parties belligérantes usèrent de la tactique de la guerre de mines à Perthes-les-Hurlus (village détruit), puis, dès 1918 d'importantes destruction de REG et surplus de guerre furent opérées. Le camp militaire actif de Suippes (ancien camp de Châlons) est encore de nos jours régulièrement bombardé par l'Artillerie et l'Aviation lors d'exercice et sort aussi de terrain de destruction de munitions anciennes, toutes guerres confondues.

Le captage de Neufchâtel-sur-Aisne est situé dans les anciennes arrières lignes Allemandes à l'est d'un secteur très actif du front (Chemin des Dames) tandis que le puits de Cramont, à plus de 40 kilomètres du front), situé en zone sous contrôle britannique, est implanté en aval direct d'un important centre de destruction industrielle de REG britanniques et allemands (au moins 11 000 tonnes) exploités par deux industriels successifs dans l'entre-deux-guerres

Les études « diagnostics » réalisées par l'ANSES en 2020 et 2021 au niveau national et régional en région Grand'Est, ainsi que les études sectorielles originales réalisées dans le cadre de cette recherche montrent l'occurrence dans les eaux de composés d'origine pyrotechnique caractéristiques des explosifs et matières énergétiques produits et utilisés durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental.

Les eaux des EDCH échantillonnées par les ARS entre 2020 et 2022 dans les régions Grand'Est et Hauts-de-France sont en partie marquées par les ions perchlorate (ClO_4-) et de nombreux composés organiques nitrés nitroaromatiques (NAC, *NitroAromatic Compounds*). Concernant les NAC, sur les 54 échantillons provenant des Hauts-de-France, 14 furent positifs (26%) et sur 197 échantillons 46 s'avérèrent positifs en région Grand'Est (13,6%). Les concentrations en NAC sont majoritairement inférieures au $\mu g.L^{-1}$, pour la ∑NAC, et sont systématiquement associées aux concentrations en ions perchlorate.

Les concentrations mesurées oscillent pour les NAC, selon les secteurs et les composés entre quelques $ng.L^{-1}$ à près de 14 000 $ng.L^{-1}$ (source du lavoir à Vauquois). Pour les ions perchlorate, les concentrations s'inscrivent dans une large gamme, depuis des concentrations proches des limites de quantification (0,5 $\mu g.L^{-1}$) à 123 $\mu g.L^{-1}$ (source du Four-de-Paris, Argonne). Les ions chlorate ont aussi été localement quantifiés à des concentrations pouvant s'élever jusqu'à 142 000 $\mu g.L^{-1}$ (Fontaine Notre Dame, Vauquois).

Quels que soient les secteurs étudiés, les cortèges de composés identifiés dans les eaux par les analyses au laboratoire sont proches ou identiques, constitués par les composés (i) persistants dans les conditions physico chimiques habituellement rencontrées dans les sols et aquifères et (ii) les plus mobiles, du fait de leur solubilité mais surtout de leur propension à n'être pas ou peu retenus par sorption par les matrices solides des sols et des aquifères. Il s'agit des ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-), qui possèdent un comportement de traceur parfait (en migrant à la même vitesse que l'eau dans laquelle il est dissout) et certains NAC parmi lesquels les isomères du dinitrotoluène (DNT) (et notamment les isomères symétriques ortho-substitués comme le 2,6-DNT), les isomères du dinitrobenzène (DNB) et les isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT) (métabolite de transformation réductive du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT))

La nature de ces cortèges présents dans les eaux n'est pas le reflet des importances relatives des tonnages des différentes matières énergétiques produites et utilisées durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental mais celui du comportement environnemental différentiel des constituants des résidus d'explosifs: le TNT, l'explosif le plus utilisés, massivement notamment par les Allemands et les Britanniques, n'a été détecté qu'à l'état de traces et que très ponctuellement. Le 2,4,6-trinitrophénol, l'explosif standard réglementaire de l'artillerie française et aussi largement utilisé par les artilleries allemande et britannique, pourtant très soluble (NAC polaire), n'a pas été détecté tandis que les taux de détection les plus importants concernent les ions perchlorate qui pourtant représentaient moins de 1/5 des explosifs produits et utilisés.

La prévalence des DNT et DNB dans les cortèges de NAC signe une origine allemande. DNT, DNB furent utilisés pour le chargement de projectiles d'artillerie (DNB), d'artillerie de tranchée, grenades et fourneaux de guerre de mines. Ils n'entraient pas dans les formulations des explosifs français et britanniques. Les isomères du DNT sont les espèces dominantes lorsque les NAC ont été détectés. L'empreinte sur les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France serait essentiellement allemande. L'usage de sels chlorates pour la fabrication d'explosifs était une spécificité française (*Cheddite* ayant chargé des grenades, certains projectiles d'artillerie de tranchée de gros calibre (explosif S) et les fourneaux de destruction de la guerre de mines). L'occurrence d'ions chlorate dans les eaux (non javellisées, et ne présentant pas d'indices de biodégradation des ions perchlorate) signe donc une influence de résidus d'explosifs français.

Les résultats de cette recherche historique et environnementale démontrent que les ions perchlorate, lorsqu'ils possèdent une signature isotopique (des isotopes stables de O, Cl au sein de ClO_4^-) typique des ions de synthèse ($\Delta^{17}O$ proche ou égal à 0‰) sont issus de résidus d'explosifs anciens datant de la Première Guerre mondiale. Cette signature isotopique militaire ancienne n'est pas unique mais multiple avec des valeurs de $\delta^{18}O$ qui s'inscrivent dans un vaste spectre, entre des valeurs extrêmement appauvries (eaux souterraines de l'est rémois) (min : -30,4 ‰) et un maximum de -12 ‰. Cette dispersion des signatures synthétiques résulte de la signature isotopique de l'oxygène de la molécule d'eau des bains électrosynthétique, thermodépendante et donc variable selon la latitude, l'altitude et les saisons. Les signatures synthétiques diffèrent donc avec la localisation des sites de production et le moment de constitution des bains d'électrolyse.

Si une signature isotopique synthétique des ions perchlorate ne laisse planer aucun doute sur leur lien avec des résidus d'explosifs anciens de 1914-1918 (ces sels ne furent plus utilisés dans les explosifs post 1914-1918), l'approche isotopique ne permet pas de discriminer l'origine et la provenance de ces résidus d'explosifs dont ils sont issus.

Présents dans des formulations d'explosifs explicitement perchloratées (comme le Ch 86 / 14 et l'explosif « P ») ayant systématiquement chargé les projectiles d'artillerie de tranchée français, les explosifs perchlorates apparurent aussi dans l'Armée allemande à la fin de la guerre comme explosif de secours nitrés nitratés perchlorates pour charger les projectiles d'artillerie de tranchée et les fourneaux de guerre de mines (*Perdite, Perchloratite*, etc.) tandis que les Britanniques n'ont utilisés les sels de perchlorate que de façon totalement anecdotique dans leur artillerie de tranchée. Par contre, ces ions perchlorate sont présents de façon inattendue dans certains ergols solides et dans des explosifs nitrés nitratés standards en impuretés, en particulier dans ceux ayant chargé les grenades à manche allemandes de la fin de la guerre, possédant des compositions atypiques (mélanges complexes de NAC mono-, di, tri-nitrés) possiblement celle de déchets de production du TNT.

L'échantillon provenant de Mainvilliers (Beauce) est le seul présentant une signature isotopique franche de type naturel Atacama. Les ions perchlorate du captage de Neufchâtel-sur-Aisne présente la particularité de résulter d'un mélange d'ions possédant une signature synthétique (2/3) et une signature naturelle Atacama. Toutefois, la présente recherche historique met en exergue qu'une signature isotopique des ions perchlorate de type Atacama n'est pas systématiquement synonyme d'une origine agricole dans le contexte historique français. Les nitrates du Chili naturellement perchlorates furent en effet massivement importés en France jusque dans les années 30 comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière, mais ces mêmes nitrates furent aussi utilisés pour produire l'acide nitrique nécessaire à la fabrication des explosifs, par sulfonitration des hydrocarbures pour la synthèse des NAC et/ou la fabrication du nitrate d'ammonium. Des ions perchlorate naturels pourraient être présents dans les explosifs. A contrario, la production de nitrates de synthèse destinés à la fabrication des poudres et explosifs au moyen du procédé de fixation de l'azote atmosphérique à l'arc électrique (procédé Birkeland Eyde), durant lequel des conditions proches de celles concourant à la formation des ClO_4^- et nitrates dans la haute atmosphère sont reproduites, ce qui laisse entrevoir une probable signature isotopique O, Cl ces ClO_4^- (synthétiques) des nitrates (synthétiques) proche ou équivalente de celle des ions naturels du type Atacama.

Les recherches historiques ainsi que les résultats des études sectorielles exposés dans ce manuscrit mettent en exergue deux situations susceptibles d'être à l'origine de zones de pollution concentrée et d'une dégradation durable et étendue des eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique.

La première est celle des zones de guerre de mines, qui sont doublement complexes, car s'y combinent un environnement hydrogéologique anthropisé fracturé de géométrie inconnue, contrôlant le cheminement des eaux souterraines et d'infiltration, et un long historique dans lequel se mêlent des combats souterrains par la mine (à grands apports d'explosifs, parfois se chiffrant à plusieurs centaines de tonnes) et des combats violents en surface pour la prise des hauteurs, usant notamment de moyens d'artillerie de tranchées ((per)chloratés). Des destructions en masse de REG furent parfois opérées dans ou à proximité immédiate des entonnoirs de mine durant la sortie de guerre. De telles opérations sont avérées (Courtes Chausses en Argonne, Cote 108 à Berry-au-Bac, etc.) ou peuvent être pressenties sans qu'il soit possible de l'affirmer au regard des données disponibles (Allencombe à La Chapelotte). Les détonations répétées sous terre comme en surface, totales ou partielles, contribuèrent à introduire sur ces secteurs géographiques très localisés, des résidus d'explosifs dans les sols et les couloirs de fracturation du massif rocheux, précisément là où s'effectuent les circulations préférentielles des eaux souterraines (Argonne, Vauquois) et l'infiltration des eaux météoriques ou de petites nappes perchées (La Chapelotte). Des charges dysfonctionnelles abandonnées ainsi que des explosifs en vrac et autres matériels explosibles délaissés dans les systèmes de galeries profondes qui s'ennoyèrent peuvent aussi contribuer à marquer durablement les eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique.

Ainsi, en Argonne, les eaux des sources et des extrémités de galeries ennoyées s'avèrent très marquées par les ions perchlorate, se répartissant suivant un axe d'orientation nord-est / sud-ouest, coïncidant avec la direction Haute-Chevauchée (Cote 285) au nord-est / Four-de-Paris au sud-ouest, qui est celui d'un front particulièrement actif en surface (1915) et surtout en profondeur avec une guerre de mines qui s'éternisa jusqu'en 1918 par camouflets interposés, impliquant des quantités considérables d'explosif. Il s'agit de l'orientation des ravins et des croupes topographiques modelant le relief argonnais et probablement aussi d'un couloir d'intense fracturation artificielle de la Gaize qui draine à présent les eaux impactées de la nappe de la Gaize, qui s'écoulent depuis la vallée de l'Aire à l'est vers celle de la Biesme à l'ouest. Le point topographiquement le plus bas, le Four-de-Paris, constitue probablement l'exutoire du système hydrogéologique fracturé anthropisé et des polluants qu'il renferme. Les sources du Four-de-Paris sont très nettement les plus impactées en ions perchlorate dont l'origine synthétique a été démontrée. (i) Les ions chlorate (de la *Cheddite*), la nitroglycérine (de la *Dynamite-Gomme*) ainsi que les ions perchlorate (avec un signature isotopique Atacama) (de la poudre noire) peuvent provenir de fourneaux français, (ii) l'aluminium, les ions nitrate et ammonium (de l'*Ammonal*) de fourneaux britanniques. L'empreinte des explosifs allemands constituant les fourneaux de mine est caractérisée par le TNT (et les isomères des ADNT qui en découlent), les isomères du DNT, les impuretés des DNT et TNT (des explosifs de sureté et des *Perdites*) ainsi que par les ions perchlorate (avec une signature isotopique synthétique) (des *Perdites*). Cette guerre de mines fut pratiquée sur certains secteurs particuliers, disputés, répartis sur toute la ligne du front occidental, là où les conditions géologiques et militaires s'y prêtaient.

La seconde situation est celle des centres de destructions des Restes Explosifs de Guerre et des surplus de l'Artillerie. En effet durant la guerre et surtout dès novembre 1918, des consignes furent passées afin de faire procéder à la récupération des matières et matériels explosibles des munitions éparses, tirées (UXO) ou non utilisées, qu'elles soient françaises, alliées ou encore allemandes, abandonnées au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Les matières explosibles initialement dispersées se retrouvèrent ainsi concentrées sur une aire géographique restreinte.

Ces mécanismes de rassemblement et d'accumulation de masses, initialement dispersées sur de vastes secteurs géographiques, sur des zones d'extension très restreinte, ont généré des situations où sont rassemblées les conditions pouvant déboucher sur la formation de zones de pollution concentrées, si ces masses sont déconfinées, extraites de leurs contenants, et introduites dans les sols. Dans le cas des REG, ceci s'opère lors des destructions des engins par *Open Detonation* (OD) en masse (cf. Sections 1e et 3e du présent manuscrit). Les retours d'expérience étrangers ainsi que les études originales exposés dans le présent manuscrit montrent que cette pratique de destruction de munitions obsolètes, hors services, en surplus est polluante.

Le site de Cramont Conteville apporte une preuve irréfutable que ces sites de destruction contribuent au marquage des eaux souterraines par des ions perchlorate (de synthèse) issus des explosifs, accompagnés par des NAC dont la nature dépend des explosifs et munitions pétardés et de leur comportement environnemental.

Le report des localisations des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans le cadre de l'inventaire national du BRGM (parmi lesquels une majorité de sites de destruction par OD) dans les grandes régions Hauts-de-France et Grand 'est' sur la carte de distribution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH (2011-2015) montre que l'empreinte perchloratée des eaux est bien mieux géographiquement corrélée à la répartition des sites de destruction de REG qu'aux anciennes lignes du front occidental.

Les sites de destruction et les EDCH marquées par les ions perchlorate sont majoritairement localisés à l'est de ces lignes dans ce qui était les zones des étapes et des armées d'occupation allemande, là où étaient situés les dépôts allemands que les troupes du *Reich* abandonnèrent en 1918 lors de leur retraite. Or, (i) les munitions ex-allemandes furent rassemblées puis systématiquement détruites dans l'entre-deux-guerres, ce qui signifie qu'un grand nombre (inconnu) de terrains de destruction démolirent des matériels et matières explosibles de confection allemande, (ii) les cortèges de NAC caractérisés à la faveur de cette recherche sont dominés par des composés entrant dans les formulation d'explosifs typiquement allemands (DNT, DNB, TNN).

Dans les secteurs non concernés par la guerre de mines (comme au Lingekopf) et les destructions massives de REG, des composés d'origine pyrotechnique, de nature et en quantités susceptibles de dégrader durablement la qualité des eaux souterraines, ont pu être introduits dans les sols à la faveur de tirs d'artillerie, en particulier dans les secteurs intensément pilonnés. Le nombre de projectiles déflagrés (détonation de bas-ordre) ou restés inertes (UXO) introduits dans les sols consécutivement à des tirs est directement proportionnel aux quantités tirées et serait de l'ordre de 25% des engins vectorisés. Cette recherche montre (cf. Section 1e du présent manuscrit) que ces projectiles dysfonctionnels peuvent être des pourvoyeurs de composés d'origine pyrotechnique dans les sols en exposant instantanément (après déflagration) ou de façon différée (après une phase de corrosion des *casings* pouvant exiger des centaines d'années) tout ou partie de leur chargement à l'environnement. (i) Les engins épars et isolés détruits par pétardement, (ii) les projectiles tirés et déflagrés et (iii) les projectiles tirés et non explosés sont possiblement à l'origine d'un marquage diffus des eaux souterraines par les ions perchlorate et les autres composés d'origine pyrotechnique à des concentrations moindres que celles constatées dans les secteurs de guerre de mines et de destruction massive des REG.

L'empreinte perchloratée et pyrotechnique des eaux souterraines dans le quart nord-est de la France apparaît donc majoritairement allemande et liée aux pratiques guerrières et à la démilitarisation des sols dans la sortie de guerre. Elle est une résultante de (i) l'usage et/ou à l'abandon durant la Première Guerre mondiale par les armées en campagne de quantités considérables (par centaines de milliers de tonnes) de matériels et de matières explosibles, en particulier dans les secteurs de guerre de mines fortement disputés, mais aussi (ii) des destructions à des échelles industrielles de quantités considérables de Restes Explosifs de Guerre et surplus d'engins obsolètes, en particulier ex-allemands dans l'entre-deux-guerres. Des sites hybrides où les sites de guerre de mine et de destruction de Restes Explosifs de Guerre ont aussi été identifiés. Ces ions perchlorate, très mobiles et persistants dans les eaux, peuvent être issus de la dissolution de résidus d'explosifs d'une grande diversité introduits dans les sols et/ou le milieu souterrain, mais aussi provenir en partie (dans des proportions impossibles à estimer dans l'état actuel des connaissances) de terrains où ils purent s'emmagasiner consécutivement à l'usage de nitrates du Chili naturellement perchloratés notamment importés comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière dans le nord de la France.

La Grande Guerre a donc marqué durablement les eaux souterraines. Ces recherches ne sont pas exhaustives compte tenu (i) du nombre restreints (ii) de la nature (forages et sources EDCH, sources non captées, etc.) des points échantillonnés et ne donnent qu'une vision partielle de la distribution spatiale et de la dynamique temporelle de l'empreinte historique de la Grande Guerre sur les eaux souterraines. Il s'agit toutefois de la première démonstration, établie sur des méthodes et moyens scientifiques originaux combinés à des recherches historiques approfondies, du lien entre un conflit majeur interétatique et une dégradation durable de la qualité des eaux souterraines.

La Grande Guerre industrielle déboucha sur un après-guerre industriel plus polluant encore que la guerre. Le nettoyage en quelques années des anciens champs de bataille et les opérations de remise en état des sols se traduisirent par une dégradation durable et locale des sols (sites de destruction de REG) qui impacte à des échelles plus étendues, régionales, la qualité des eaux souterraines par les composés les plus mobiles et les plus persistants présents dans les résidus d'explosifs. Cette empreinte de la guerre et de la sortie de guerre perdure 100 ans après leur conclusion et persisteront encore sur des échelles de temps sans aucune commune mesure avec celles des évènements qui l'ont généré.

Résumé et conclusions du volet environnemental

Des munitions et autres matières et matériels explosibles et agressifs furent produits et utilisés durant la Première Guerre mondiale (1914-1918) sur le front occidental (entre la mer du Nord, en Belgique, au nord, jusqu'à la frontière franco-suisse au sud) par millions de tonnes et dans des proportions inédites, pour notamment alimenter les moyens de l'Artillerie, qui devint avec la Première Guerre mondiale, une arme majeure qui domina les champs de bataille. Cette grande guerre industrielle déboucha sur une sortie de guerre industrielle. La fin de la guerre surprit à l'automne 1918 les protagonistes qui abandonnèrent des quantités gigantesques de matériels militaires en surplus, obsolètes et hors service sur les champs de bataille, leurs abords et dans les arrières. Des opérations de destruction de ces matériels dangereux furent menées durant la guerre et plus encore, à l'échelle industrielle, dans l'immédiate sortie de guerre par l'impérieuse nécessité des reconstructions et de la remise en état des sols. L'usage et la destruction des munitions et matériels explosibles, des ergols solides (poudres) et explosifs qu'ils renfermaient, ont pu être à l'origine de l'introduction dans les sols des mélanges de substances chimiques énergétiques susceptibles de détoner ou déflagrer, mais aussi, une fois exposés à l'environnement, de dégrader durablement la qualité des sols et/ou des eaux.

L'objectif de ce volet de cette recherche est d'abord de comprendre, au regard des éléments historiques exposés dans le volet précédent, comment, par quels phénomènes, l'usage et/ou la destruction centenaires, à grande échelle, de matériels et matériels explosibles et agressifs caractéristiques de la Grande Guerre ont pu être à l'origine de pollutions actuelles des sols et/ou des eaux souterraines.

Il s'agit en particulier d'apprécier si la qualité des eaux souterraines, sollicitées pour l'alimentation en eau potable (EDCH, Eaux Destinées à la Consommation Humaine), reconnues marquées par les ions perchlorate (ClO_4^-) entre 2011 et 2015 à l'échelle régionale dans le quart nord-est de la France, a été, est encore, et/ou sera influencée par des résidus de matières explosibles et/ou agressives de la Grande Guerre. A cette date aucune recherche publiée ne vient établir un lien entre les conflits majeurs du XXe siècle et la dégradation de la qualité des eaux souterraines à l'échelle des anciennes lignes de front. Cette démarche de recherche implique de caractériser l'empreinte spécifique (*Fingerprint*) de ces résidus centenaires dans des eaux dont la qualité est susceptible d'être influencée et modifiée par ailleurs par de nombreuses activités anthropiques autres que la guerre (industrie, agriculture). La question des origines militaires et/ou agricoles anciennes des ions perchlorate dans les eaux est posée. Ensuite, si le marquage des eaux par ces résidus est avéré, il s'agit de comprendre par quels mécanismes ces substances chimiques ont pu être introduites dans les sols, en générant des pollutions locales et concentrées, ou diffuses et étendues, puis éventuellement migrer jusqu'aux eaux souterraines. Enfin, il s'agit aussi de comprendre ou de proposer des hypothèses les plus plausibles sur quels auraient été les faits et pratiques historiques à leur origine, au regard des connaissances exposées dans le volet historique du présent manuscrit concernant l'usage et la liquidation des matériels et matières explosibles durant la guerre et dans l'entre-deux-guerres.

Antérieurement à 2020, le marquage actuel de la qualité des eaux souterraines par des substances historiques en lien avec la Première Guerre mondiale (1914-1918) dans le quart nord-est de la France était une hypothèse plausible compte tenu (i) de la démonstration par les ARS et l'ANSES entre 2011 et 2015 de la présence inattendue dans les EDCH d'ions perchlorate le long et aux abords des anciennes lignes de front mais aussi dans des secteurs qui n'avaient pas été directement concernés par les évènements de la Grande Guerre, (ii) de l'usage d'explosifs perchlorates durant 1914-1918.

Les recherches historiques exposées dans ce manuscrit, partagées avec l'ANSES, démontrent que les explosifs (per)chlorates représentaient moins de 1/5e du tonnage des matières énergétiques utilisées, très largement dominées par les explosifs nitrés (à base de NAC) et nitratés (à base de NH_4NO_3). Si l'origine militaire ancienne des ClO_4- présents dans les EDCH s'avérait exacte, les ions perchlorate pourraient alors être associés aux constituants des explosifs nitrés et/ou nitratés. Tout comme les perchlorates, ces composés n'étaient ni réglementés ni recherchés en routine dans les EDCH en France.

L'ANSES organisa et pilota alors, entre 2020 et 2022, une campagne nationale exploratoire et une campagne régionale (en région Grand'Est, afin de répondre aux objectifs du Plan Régional Santé Environnement n°3 (PRSE3)) de recherche des résidus d'explosifs dans les EDCH en tant que polluants émergents susceptibles d'être présents dans ces eaux dans des secteurs où l'occurrence d'ions perchlorate fut constatée. Un important effort de développement analytique fut entrepris par le Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES pour pouvoir doser une cinquantaine de composés organiques nitrés (à des concentrations de l'ordre du $ng.L^{-1}$ à la centaine de $ng.L^{-1}$ selon les composés) entrant dans la formulations typiques des ergols solides et des explosifs de la Grande Guerre. Le panel analytique fut aussi étendu aux stabilisants, impuretés et sous-produits de transformation environnementale de ces matières énergétiques.

La présence locale des NAC dans les EDCH a été confirmée. Sur les 54 échantillons provenant des Hauts-de-France, 14 furent positifs (26%) et sur 197 échantillons 46 s'avérèrent positifs en région Grand'Est (13,6%). Les concentrations en NAC étaient majoritairement inférieures à 1 000 $ng.L^{-1}$ (∑NAC), et systématiquement associées aux concentrations en ions perchlorate sans pour autant qu'il y ait une corrélation entre les concentrations des NAC et de ClO_4^-.

Les mesures des concentrations dans les EDCH ne sont pas nécessairement représentatives de la qualité réelle de la ressource en eau sollicitée. Ces recherches « diagnostics » ont alors été complétées par des études approfondies sur certains secteurs de l'ancien front occidental et au-delà, judicieusement sélectionnés pour leur intérêt historique, hydrogéologique et environnemental. Quatre secteurs présentent un intérêt tout particulier pour la caractérisation des *Fingerprints* (cortèges) signant de l'empreinte de 1914-1918 sur les eaux: les secteurs du Lingekopf (département du Haut-Rhin), de La Chapelotte (département de la Meurthe-et-Moselle) sur le front du massif des Vosges et les secteurs de l'Argonne (départements de la Marne et de la Meuse) et de Vauquois (département de la Meuse). Il s'agit de territoires (forestiers) qui n'ont pas connu d'autres activités potentiellement polluantes que les évènements de 1914-1918. Les champs de bataille de La Chapelotte, de l'Argonne et de Vauquois présentent la particularité d'avoir été les hauts lieux de la guerre souterraine de mines sur le front occidental, de par le nombre et la densité des détonations (Vauquois), l'extension géographique (Argonne) et les profondeurs investies par les chantiers souterrains (La Chapelotte). Les combats s'y déroulèrent à la fois en surface et sous terre. Une étude sectorielle concerne aussi un vaste secteur centré sur l'actuel camp militaire actif de Suippes, ancienne *zone rouge* du front de Champagne (département de la Marne). Ce secteur incluant les captages AEP de Dontrien et Souain Perthes-les-Hurlus constitua le théâtre des opérations de violentes et importantes batailles durant 1914-1918 (impliquant aussi la guerre de mines) et vit la persistance d'activités militaires après 1918, avec notamment des destructions en masse de REG, dans un environnement vulnérable (nappe de la Craie) dédié aux cultures intensives du maïs, du blé et de la betterave sucrière (plaine agro-industrielle de la Champagne crayeuse).

Enfin, des analyses approfondies complémentaires à celles de l'ANSES furent réalisées sur les eaux des captages AEP marqués par les NAC et ClO_4- de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne) et de Cramont (département de la Somme). Le captage de Cramont présente la particularité d'être éloigné de près de 50 km au nord-ouest du front de la Somme (en secteur britannique).

Les eaux échantillonnées dans ces secteurs correspondent à des sources AEP captées ou non aménagées (La Chapelotte, Lingekopf, Argonne et Vauquois), des puits AEP (Dontrien, Souain, Neufchâtel-sur-Aisne, Cramont), des eaux de surface (rivières Dormoise, Marson, Suippes et Py du secteur de Suippes). Quatre phases de reconnaissances spéléologiques des systèmes profonds de galeries de guerre de mines de l'Argonne (Haute-Chevauchée et Fille Morte) et de Vauquois furent menées pour (ii) apprécier les quantités et la nature des matériels et matières explosibles abandonnés sous terre, (ii) échantillonner ces matières et les eaux souterraines ennoyant les extrémités de ces systèmes.

Les eaux ont été analysées pour la recherche systématique des ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrate (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) et plus ponctuellement des anions et cations majeurs. Les NAC ont été dosés par le LHN selon des protocoles identiques à ceux mis en œuvre lors de la campagne nationale exploratoire de l'ANSES de 2020-2021.

Enfin, des protocoles originaux ont été appliqués pour échantillonner sélectivement les ions ClO_4^- pour l'analyse au laboratoire (Université du Delaware, USA) des isotopes stables de O, Cl dans ClO_4^- (mesures des abondances). Ces analyses permettent de discriminer sur la base des signatures isotopiques $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ et $D^{17}O$ / $\delta^{18}O$, une origine synthétique de ClO_4^- (comme pour les explosifs explicitement perchloratés) ou naturelle, notamment en lien avec la présence de sels de perchlorate dans les engrais anciens à base de nitrates du Chili (Atacama). Ces mesures de « *Forensie*[2092] » environnementale ont été environnées par des mesures effectuées sur (i) des eaux marquées en France et à l'étranger par des pollutions en ClO_4^- concentrées (industrielles) et diffuses, (ii) des sols fortement pollués en ClO_4^-, (iii) des effluents d'électrosynthèse actuels des $NaClO_3$ et $NaClO_4$, (iiii) des explosifs français et allemands datant de la Grande Guerre. Ces données furent complétées par un vaste jeu de données issu des travaux de recherche de Neil Sturchio (Université du Delaware) concernant (i) des perchlorates de synthèse (ii) des perchlorates naturels de type Atacama, et (iii) des perchlorates naturels provenant d'autres zones arides de par le monde.

Les concentrations mesurées oscillent pour les NAC, selon les secteurs et les composés entre quelques $ng.L^{-1}$ à près de 14 000 $ng.L^{-1}$ (source du lavoir à Vauquois). Pour les ions perchlorate, les concentrations s'inscrivent dans une large gamme, depuis des concentrations proches des limites de quantification (0,5 $\mu g.L^{-1}$) à 123 $\mu g.L^{-1}$ (source du Four-de-Paris, Argonne). Les ions chlorate ont aussi été localement quantifiés à des concentrations pouvant s'élever jusqu'à 142 000 $\mu g.L^{-1}$ (Fontaine Notre Dame, Vauquois).

Quels que soient les secteurs étudiés, les cortèges de composés identifiés dans les eaux par les analyses au laboratoire sont proches ou identiques, constitués par les composés (i) persistants dans les conditions physico chimiques habituellement rencontrées dans les sols et aquifères et (ii) les plus mobiles, du fait de leur solubilité mais surtout de leur propension à n'être pas ou peu retenus par sorption par les matrices solides des sols et des aquifères. Il s'agit des ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-), qui possèdent un comportement de traceur parfait (en migrant à la même vitesse que l'eau dans laquelle il est dissout) et certains NAC parmi lesquels les isomères du dinitrotoluène (DNT) (et notamment les isomères symétriques ortho-substitués comme le 2,6-DNT), les isomères du dinitrobenzène (DNB) et les isomères des amino-dinitrotoluène (ADNT) (métabolite de transformation réductive du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT))

[2092] Recherches et outils permettant de déterminer l'origine et/ou la datation des pollutions environnementales.

La nature de ces cortèges présents dans les eaux n'est pas le reflet des importances relatives des tonnages des différentes matières énergétiques produites et utilisées durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental mais celui du comportement environnemental différentiel des constituants des résidus d'explosifs: le TNT, l'explosif le plus utilisé, massivement notamment par les Allemands et les Britanniques, n'a été détecté qu'à l'état de traces et que très ponctuellement. Le 2,4,6-trinitrophénol, l'explosif standard réglementaire de l'artillerie française et aussi largement utilisé par les artillerie allemandes et britanniques, pourtant très soluble (NAC polaire), n'a pas été détecté tandis que les taux de détection les plus importants concernent les ions perchlorate qui pourtant représentaient moins de 1/5 des explosifs produits et utilisés.

La prévalence des DNT et DNB dans les cortèges de NAC signe une origine allemande. DNT, DNB furent utilisés pour le chargement de projectiles d'artillerie (DNB), d'artillerie de tranchée, grenades et fourneaux de guerre de mines. Ils n'entraient pas dans les formulations des explosifs français et britanniques. Les isomères du DNT sont les espèces dominantes lorsque les NAC ont été détectés. L'empreinte sur les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France serait essentiellement allemande. L'usage de sels chlorates pour la fabrication d'explosifs était une spécificité française (*Cheddite* ayant chargé des grenades, certains projectiles d'artillerie de tranchée de gros calibre (explosif S) et les fourneaux de destruction de la guerre de mines). L'occurrence d'ions chlorate dans les eaux (non javellisées, et ne présentant pas d'indices de biodégradation des ions perchlorate) signe donc une influence de résidus d'explosifs français.

Les résultats de cette recherche historique et environnementale démontrent que les ions perchlorate, lorsqu'ils possèdent une signature isotopique (des isotopes stables de O, Cl au sein de ClO_4^-) typique des ions de synthèse ($\Delta^{17}O$ proche ou égal à 0‰) sont issus de résidus d'explosifs anciens datant de la Première Guerre mondiale. Cette signature isotopique militaire ancienne n'est pas unique mais multiple avec des valeurs de $\delta^{18}O$ qui s'inscrivent dans un vaste spectre, entre des valeurs extrêmement appauvries (eaux souterraines de l'est rémois) (min : -30,4 ‰) et un maximum de -12 ‰. Cette dispersion des signatures synthétiques résulte de la signature isotopique de l'oxygène de la molécule d'eau des bains électrosynthétique, thermodépendante et donc variable selon la latitude, l'altitude et les saisons. Les signatures synthétiques diffèrent donc avec la localisation des sites de production et le moment de constitution des bains d'électrolyse.

Si une signature isotopique synthétique des ions perchlorate ne laisse planer aucun doute sur leur lien avec des résidus d'explosifs anciens de 1914-1918 (ces sels ne furent plus utilisés dans les explosifs post 1914-1918), l'approche isotopique ne permet pas de discriminer l'origine et la provenance de ces résidus d'explosifs dont ils sont issus.

Présents dans des formulations d'explosifs explicitement perchloratées (comme le Ch 86 / 14 et l'explosif « P ») ayant systématiquement chargé les projectiles d'artillerie de tranchée français, les explosifs perchlorates apparurent aussi dans l'Armée allemande à la fin de la guerre comme explosif de secours nitrés nitratés perchlorates pour charger les projectiles d'artillerie de tranchée et les fourneaux de guerre de mines (*Perdite, Perchloratite*, etc.) tandis que les Britanniques n'ont utilisés les sels de perchlorate que de façon totalement anecdotique dans leur artillerie de tranchée. Par contre, ces ions perchlorate sont présents de façon inattendue dans certains ergols solides et dans des explosifs nitrés nitratés standards en impuretés, en particulier dans ceux ayant chargé les grenades à manches allemandes de la fin de la guerre, possédant des compositions atypiques (mélanges complexes de NAC mono-, di, tri-nitrés) possiblement celle de déchets de production du TNT.

L'échantillon provenant de Mainvilliers (Beauce) est le seul présentant une signature isotopique franche de type naturel Atacama. Les ions perchlorate du captage de Neufchâtel-sur-Aisne présentent la particularité de résulter d'un mélange d'ions possédant une signature synthétique (2/3) et une signature naturelle Atacama. Toutefois, la présente recherche historique met en exergue qu'une signature isotopique des ions perchlorate de type Atacama n'est pas systématiquement synonyme d'une origine agricole dans le contexte historique français.

Les nitrates du Chili naturellement perchloratés furent en effet massivement importés en France jusque dans les années 30 comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière, mais ces mêmes nitrates furent aussi utilisés pour produire l'acide nitrique nécessaire à la fabrication des explosifs, par sulfonitration des hydrocarbures pour la synthèse des NAC et/ou la fabrication du nitrate d'ammonium. A contrario, la production de nitrates de synthèse destinés à la fabrication des poudres et explosifs au moyen du procédé de fixation de l'azote atmosphérique à l'arc électrique (procédé Birkeland Eyde), durant lequel des conditions proches de celles concourant à la formation des ClO_4^- et nitrates dans la haute atmosphère sont reproduites, ce qui laisse entrevoir une probable signature isotopique O, Cl ces ClO_4^- (synthétiques) des nitrates (synthétiques) proche ou équivalente de celle des ions naturel du type Atacama.

Chlorate, perchlorate et NAC actuellement mesurés dans les eaux étaient des substances entrant dans diverses formulations d'ergols solides et d'explosifs qui, dans la grande majorité des cas, étaient isolés de l'environnement par des contenants métalliques des *casings* des munitions ou des étuis des cartouches. Les explosifs des charges de destruction (fourneaux) étaient simplement emballés dans des papiers paraffinés puis conditionnés dans des caisses en bois. Les modalités d'introduction dans l'environnement des constituants des matières énergétiques furent donc étudiées afin d'établir un lien de causalité entre le marquage des eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique et les faits et pratiques militaires de la Première Guerre mondiale, les opérations de liquidation des Restes Explosifs de Guerre durant le conflit et surtout durant la sortie de guerre. Les explosifs confinés dans les projectiles ne peuvent être mis au contact de l'environnement que par la disparition ou la rupture des *casings.* Celles-ci s'opèrent en premier lieu à l'issue des tirs.

Aucune étude portant spécifiquement sur les modalités d'introduction de matières énergétiques dans les sols et/ou les eaux souterraines en lien avec leur usage, leur stockage et leur destruction durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental ou post-conflit n'a été identifiée dans la littérature scientifique publiée et consultée dans le cadre de la présente recherche. De nombreuses recherches ont été menées aux USA dans les années 2000 par l'*US Corps of Engineers* (*Department of Defence Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP)) sur les terrains d'exercice et champs de tir actifs, parfois anciens, afin d'appréhender, qualifier et quantifier (i) la production et la dispersion des résidus d'explosifs (imbrûlés) consécutivement aux détonations de munitions tirées, (ii) les mécanismes et cinétiques de corrosion des *casings* des engins non explosés (*Unexploded Ordnances*, UXO) et (iii) les durées de vie des particules d'imbrûlés dans les sols et leurs cinétiques de dissolution. Ces recherches sur des champs de tir de munitions modernes permettent d'approcher, par analogie, les mécanismes en jeu susceptibles de mobiliser les constituants des chargements des munitions tirées sur les champs de bataille de la Grande Guerre vers l'environnement ainsi que leurs dynamiques spatiales et temporelles.

Ces recherches montrent que tous les régimes de détonation sont pourvoyeurs de particules d'imbrûlés dans les sols. Les substances chimiques solubles formant ces particules d'explosif peuvent être mobilisées vers les sols et les eaux souterraines au contact des eaux météoriques par le phénomène de dissolution. Ces cinétiques de dissolution dépendent des conditions environnementales (pluviométrie, température, etc.), de la solubilité de chacun des composés présents dans les formulations d'explosifs, et de la nature des assemblages. Ainsi, même si les chlorates (ClO_3^-) et perchlorates (ClO_4^-) figurent parmi les sels les plus solubles, la cinétique de dissolution des explosifs (per)chloratés, bien qu'inconnue, est vraisemblable très faible du fait du mélange de ces sels avec de la paraffine (insoluble et hydrophobe). Ces fragments d'explosifs peuvent ainsi persister dans les sols sur de longues périodes de temps et libérer de faibles flux d'ions chlorate et perchlorate (exprimés par exemple en g / an / km^2) vers les eaux souterraines.

La grande majorité des projectiles tirés a normalement fonctionné comme escompté et a suivi un régime de détonation de haut-ordre (HOD, *High-Order Detonation*) durant lequel les engins ont été intégralement disloqués et leur chargement décomposé laissant un faible pourcentage d'imbrûlés résiduels estimé par les études nord-américaines à 0,001 % en poids du chargement initial. Ces particules solides qui ont été finement dispersées autour du point de détonation, mélangées avec les matériaux pédologiques, possèdent une granulométrie inférieure au millimètre et sont de fait rapidement dissoutes (en moins d'un an) au contact des eaux météoriques. Durant la Grande Guerre, le régime de détonation de haut-ordre fut suivi par environ 75% des projectiles. Les imbrûlés issus de ces détonations ne peuvent constituer, plus de 100 ans après l'arrêt des hostilités, des sources actuelles encore actives dégradant toujours la qualité des eaux souterraines.

25% environ des tirs d'artillerie sur le front occidental durant la Première Guerre mondiale se soldèrent par des incidents de tir, les projectiles en question connaissant alors soient une détonation partielle de bas-ordre (LOD, *Low-Order Detonation*), soit un dysfonctionnement total à l'origine de la « pollution pyrotechnique » des champs de bataille (présence sur et dans les sols d'engins tirés et non explosés ou *UXO*).

Les *casings* métalliques des UXO subissent au contact de l'oxygène, de l'eau et des conditions environnementales, une dégradation, puis une désagrégation, désignée par corrosion, se traduisant, à plus au moins long terme, par la perte de tout ou partie de l'intégrité des *casings* et à la mise en contact des chargements avec l'environnement. L'exposition des chargements à l'environnement s'effectue sur des échelles de temps dépendantes des cinétiques de corrosion (variant selon la nature des métaux, de l'état des *casings* et des conditions environnementales) et des épaisseurs des *casings*. La corrosion est un phénomène complexe, faisant appel à de nombreux mécanismes chimiques, électrochimiques, et combinant une corrosion généralisée et une corrosion ponctuelle (perforante). Aucune recherche publiée ciblant les mécanismes et cinétiques de corrosion des enveloppes des UXOs de la Première Guerre mondiale n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche. Les recherches menées sur les munitions modernes montrent que le processus de corrosion suit un processus en au moins trois phases avec des cinétiques très lentes. Les professionnels du déminage sont catégoriques : les engins extraits des sols cent ans après leur tir sont globalement en bon état.

Des cinétiques inférieures à 0,1 $mm.an^{-1}$ et une valeur de 0,025 $mm.an^{-1}$ sont généralement retenues dans les modèles de corrosion des études américaines (SERDP, ERDC (2014))[2093] et allemandes (LfU (2009) Land de Bavière)[2094]. A ce rythme et au regard des épaisseurs des parois des *casings* des munitions de la Grande Guerre, des siècles seraient encore nécessaires avant que leurs chargements soient exposés à l'environnement. L'hétérogénéité des conditions physico-chimiques régnant dans les sols hôtes des UXOs le long des anciennes lignes du front occidental, la diversité (i) des engins, (ii) de leur état après impact, (iii) des épaisseurs de leurs parois, laissent présager une libération différée, incontestablement progressive, difficilement prévisible dans le temps comme dans l'espace, des constituants solubles, mobiles, persistants, et toxiques formant les chargements.

Les données concernant (i) le pourcentage de munitions tirées ayant suivi un régime de déflagration (détonation de bas-ordre), (ii) le taux d'imbrûlés après le dysfonctionnement de ces projectiles, sont éminemment plus complexes à acquérir.

[2093] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations*? op. cit.

[2094] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil. op. cit.*

Les fréquences de LOD des munitions modernes tirées sur les champs de tir actifs en Amérique du Nord, s'établiraient entre 0,01 et 0,001%. Lors des déflagrations, les *casings* des projectiles sont partiellement déchirés et le chargement expulsé et dispersé autour du point de détonation en une multitude de fragments pluri millimétriques à centimétriques, plus au moins grossiers (respectivement désignés par « *chunk*s » et « *flakes* »). De l'explosifs adhère généralement encore aux parties les plus solides des projectiles (ogives et culots). Ces fragments peuvent subsister dans les sols d'autant plus longtemps que leur taille est élevée, généralement plusieurs dizaines à centaines d'années. La dissolution des fractions solubles de ces fragments conduit à leur émiettement progressif qui concoure à accélérer les cinétiques de dissolution. Selon les hypothèses et valeurs annoncées par les études, la détonation de bas-ordre d'un seul engin tiré libèrerait dans les sols, au point d'impact, une masse résiduelle environ 5 fois plus élevée que celle générée par les détonations de haut-ordre de 1 000 projectiles.

Ces fragments peuvent donc constituer encore aujourd'hui des sources actives et rémanentes de pollution et influencer la qualité des sols et des eaux souterraines par dissolution.

L'introduction dans les sols puis les eaux souterraines de résidus d'explosifs suivant les modalités de LOD, HOD et de corrosion d'UXOs peut s'effectuer ponctuellement sur les sites de destruction de Restes Explosifs de Guerre (REG) par pétardement (OD, *Open Detonation)*. Il s'agit d'une méthode ancienne, radicale, de neutralisation des projectiles explosifs qui se base sur la transmission volontaire d'une détonation (d'une charge initiale « donneuse ») par « sympathie » à une munition ou à un ensemble d'engins et/ou matériels explosibles généralement organisés en tas (dénommés « fourneaux ») selon des designs permettant aux artificiers d'optimiser la détonation. Cette méthode a été très largement mise en œuvre durant la guerre et post-conflit pour neutraliser les REG qui ne pouvaient être démontés et vidés de leurs chargements dans le cadre d'opération de récupération profitables de vieux métaux. Elle fut aussi appliquée à la destruction des engins épars, jugés dangereux et intransportables, sur le lieu de leur découverte (destruction par BIP, *Blown-In-Place)*. Les engins visés par ces démolitions peuvent suivre en une même opération, sous l'impulsion d'une même détonation initiale, tout ou partie des trois régimes (i) détonation de haut-ordre, (ii) détonation de bas-ordre et (iii) absence complète de détonation. Dans le premier cas les munitions sont intégralement lacérés en une multitudes d'éclats et fragments de différentes tailles tandis que le chargement est quasiment intégralement décomposé. Dans le second cas, les *casings* sont fracturés et le chargement partiellement décomposé, l'explosif étant libéré sous forme de particules parfois grossières (*flakes* et *chunks*) et/ou reste solidaire des fragments métalliques pour les parties les plus solides des engins. Enfin, dans le troisième cas les engins restent intègres mais subissent souvent, du fait des fortes contraintes mécaniques lors de l'explosion des fourneaux, des déformations (ovalisation, fissurations, etc.).

Les ondes de choc des détonations répétées à même le sol, en un même point, se traduisent par une compression, une désagrégation du sol et l'expulsion des matériaux pédologiques autour du point de détonation. Les fragments métalliques des *casing*s, ceux des chargements imbrûlés et les engins non détonés se mêlent aux matériaux de sol destructuré.

Des élements de munitions sont littéralement « injectés » dans les sols à la base des fourneaux. Des dépressions circulaires aux bordures surélevées (lèvres), désignées par « entonnoirs », s'ouvrent ainsi. Les dimensions de ces entonnoirs, peuvent dépasser plusieurs dizaines de mètres de diamètre pour plus de 5 mètres de profondeur, dépendent de la nature du sol, de la puissance des fourneaux, et du tonnage détruit. Après détonation, une partie des matériaux retombe dans l'entonnoir (*fall-back*), alors que d'autres sont éjectés par-dessus les lèvres à plusieurs dizaines de mètres du point de détonation (zone de retombée (*fall-out*) appelée zone de projection dont la géométrie peut être influencée par les vents dominants). Des engins ou fragments de grandes dimensions peuvent être éjectés encore plus loin, jusqu'à des distances kilométriques, et retomber dans la zone dite de dispersion (*Streugebiet*).

L'entonnoir est généralement abandonné lorsque sa profondeur rend son point le plus bas difficilement accessible pour les artificiers ou encore lorsqu'il est envahi par les eaux. Les démolitions sont alors poursuivies si nécessaire dans un entonnoir exploitable proche voisin. C'est ainsi que les entonnoirs peuvent se succéder en enfilades, en rangées parallèles, isolées ou coelescentes pour former des terrains d'explosion (TE) (ou polygones de destruction) pouvant comporter plusieurs dizaines d'entonnoirs. Les terrains d'explosion furent abandonnés tels quels post-exploitation, se comblant alors partiellement, progressivement et naturellement par des particules fines (colluvionnement) et de la matière organique. D'autres, notamment en environnement agricole, furent remblayés par des matériaux sains apportés ou par ceux, éparpillés et potentiellement pollués, présents dans la zone de projection ou par des déblais et détritus (dépotoirs).

Compte tenu (i) de la coexistence des trois comportements des engins chargeant les fourneaux sous l'effet de la sollicitation d'une même détonation initiale, (ii) de la grande diversité des munitions détruites, les résidus issus des munitions présents dans les entonnoirs et dans la zone de dispersion sont extrêmement hétérogènes en compositions et dimensions.

L'évaluation qualitative et quantitative des masses résiduelles introduites dans les sols et le taux de décomposition des masses des chargements, lors des détonations des fourneaux de destruction formés d'engins de la Grande Guerre n'a pas fait l'objet de recherches et études spécifiques au regard des éléments bibliographiques rassemblés dans le cadre de la présente recherche. Seule une approche analogique avec les résultats acquis (i) sur des munitions modernes tirées sur les champs de tir et terrains d'exercice actifs en Amérique du nord (ERDC (2014)) et (ii) sur des terrains d'explosion de destruction des REG post-Seconde Guerre mondiale en Bavière (LfU (2009)) peut être proposée, dont les limites sont discutées.

Ces études sur des munitions d'artillerie modernes montrent que la valeur de 0,001% (ERDC (2014)) de la charge explosive initiale constitue une valeur haute pour le taux de dispersion des imbrulés après détonation de haut-ordre (HOD). Une valeur similaire, de 0,003%, est retenue par le LfU (2009). La granulométrie de ces particules d'imbrûlés est très fine, de l'ordre ou inférieure à 1 mm. Le taux de 50% a été retenu dans les modèles nord-américains (ERDC (2014)) pour quantifier la masse résiduelle après détonation de bas-ordre. Les dimensions des particules retenues dans les modèles de transfert environnementaux nord-américains sont typiquement inférieures à 100 mm. Le LfU (2009) a volontairement écarté l'usage de ces valeurs estimant le pourcentage d'incertitudes trop élevé.

Ces valeurs proposées par l'ERDC (2014) comme par le LfU (2009) ne sont qu'indicatives et aucunement représentatives des masses résiduelles laissées par les pétardements massifs de fourneaux au terme de la Première Guerre mondiale qui sont vraisemblablement nettement plus élevées que celles avancées dans la littérature, comme l'attestent certains documents photographiques ou cinématographies historiques récoltés dans le cadre de cette recherche, mais aussi les observations remontées du terrain. La nature, les dimensions, les quantités et densités de résidus laissés post-détonation, dont dépendent la nature, l'extension, la magnitude et la rémanence des pollutions, des eaux souterraines et/ou des sols, générées par les sites de pétardement, sont vraisemblablement très variables d'un terrain de destruction à l'autre, voire d'un entonnoir à l'autre.

Les travaux de recherche publiés concernant la rémanence de résidus après détonation de fourneaux de destructions ou d'engins isolés ((ERDC, 2014). LfU (2009). Tomic (2018)), les résultats d'études originales sur des terrains de destruction mis à disposition pour cette présente recherche ou encore ceux issus d'études de cas réalisés dans le cadre de ce doctorat (dans le département de la Meuse (Douaumont, canton de Spincourt), dans le département du Nord (Trélon)) démontrent sans équivoque que les opérations de destruction de REG par pétardement sont polluantes et constituent un vecteur d'introduction dans les sols environnants de composés métalliques (principalement Fe, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb, Al, etc.) et d'origine pyrotechnique (majoritairement des NAC et des nitramines). Le caractère polluant de ces sites eu égard aux eaux souterraines a aussi été démontré.

Si les teneurs dans les sols de surface ([0-40 cm] en environnement labouré) en métaux, métalloïdes et autres NAC (sous-produits de transformation environnementale compris), mesurées ponctuellement sur quelques terrains d'explosion en Meuse et dans le Nord dans le cadre de cette recherche, restent faibles à modérées, il est vraisemblable qu'elles ne reflètent en rien celles susceptibles d'être rencontrées à la base des anciens entonnoirs où se concentrerait l'essentiel des fragments issus des munitions. En ce sens, ces zones de pollution concentrée sont avant tout à considérer comme des sources potentielles susceptibles de dégrader la qualité des eaux souterraines. Les fragments de chargement présents dans ces entonnoirs subissent les effets de la dissolution au contact des eaux météoriques infiltrées qui alimentent *per descensum* les nappes tandis que des mécanismes de corrosion désagrègent sur les moyens et longs termes les enveloppes métalliques des engins, causant à terme (des dizaines et centaines d'années) (i) la perte de tout ou partie de leur intégrité et (ii) l'exposition des chargements à l'environnement. Ces corrosions sont facilitées et accélérées sur les engins endommagés.

Les entonnoirs susceptibles d'être les plus marqués sont ceux (i) ayant démolis de forts tonnages de munitions explosives de gros calibres, (ii) ayant été remblayés par les matériaux de la zone de projection, et (iii) ceux n'ayant pas fait l'objet de recherches (par piochage) et de récupération dans l'entre-deux-guerres. Les terrains de destruction par OD représentent plus de 75% de l'ensemble des (environ 200) sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans l'inventaire national du BRGM[2095]. Cet inventaire est non exhaustif. L'existence de ces sites ne préjuge en rien de leur état de pollution. Les terrains d'explosion au sein desquels de forts tonnages de munitions furent éliminées par OD peuvent avoir concentré des masses importantes de fragments métalliques et de composés entrant dans la constitution des chargements quels que soient les taux de décomposition des chargements à l'issue des détonations.

Les fragments de chargement présents dans les zones de dispersion contribuent, tout comme les zones de pollution concentrée formées par les entonnoirs, au flux global en composés solubles et persistants formant les chargements rejoignant et dégradant les eaux souterraines. Qu'il s'agisse des anciens champs de bataille ou des sites OD, avec le temps, la contribution à la libération de flux et masses de composés vers les sols et/ou les eaux souterraines issus des engins de guerre enfouis, non explosés, en cours de corrosion va irrémédiablement s'accroître contrairement à celle des fragments d'explosifs déjà introduits dans l'environnement en cours de vieillissement (pertes de masse par dissolution).

Enfin, les reconnaissances de terrain réalisées sur les sites de pétardement en Meuse (canton de Spincourt, Argonne, etc.), dans le Nord, dans l'Aisne montrent que les terrains d'explosion datant de l'entre-deux-guerres constituent encore des sites dangereux où la probabilité de découverte d'engins de guerre encore en puissance d'explosion (pollution pyrotechnique) est élevée.

[2095] Hubé, D. (2019). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales*, *op. cit.*

Open Burning (brûlage à l'air libre) (OB) est autre une méthode de déchargement de projectiles et de neutralisation des REG. Elle est basée sur le principe de la différence de comportement au feu des *casings* et éléments métalliques, réfractaires, à récupérer une fois déchargés, et des chargement organiques ou organométalliques, combustibles. Elle fut opérée sur des engins, matériels de guerre ne pouvant être déchargés en toute sécurité dans un but profitable par d'autre procédés (comme la fusion à l'eau chaude), dans une perspective de récupération des vieux métaux. C'était le cas notamment des projectiles chimiques ex-allemands et des engins explosifs non déchargeables par ailleurs.

Différents designs de terrains de brulage (BG, *Burning Grounds*) et séquences de brûlage furent imaginés et mis en œuvre pour parvenir à ces fins. Trois types de terrains de brûlage furent identifiés par les reconnaissances de terrain en France comme en Belgique : (i) les tranchées / rangées de brûlage hors sol (*Burning Trenches*), (ii) des tranchées peu profondes ouvertes dans le sol (*Burning Trenches*), et (iii) des fosses et puits de brûlage peu profonds (*Burning Pits*). Les foyers étaient entretenus par du bois, dont la combustion était initiée et boostée par un saupoudrage de poudres propulsives ou encore des boues issues du déchargement d'engins explosifs.

Ces opérations de brûlage sur des tonnages importants (plusieurs milliers de tonnes) laissèrent des résidus de brûlage (déchets de combustion). Les terrains de brûlage où de tels résidus ont été identifiés, observés et caractérisés, avec des résultats exploités dans le cadre de cette recherche sont ceux (i) du site F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » (Gremilly, département de la Meuse), (ii) du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander (sites de Noire Fontaine et Rampont, canton de Spincourt, département de la Meuse), (iii) de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Trélon (Parc Jeannette) et Liessies (Bois l'Abbé), département du Nord), (iiii) de la *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Westroozebeke, Flandre occidentale, Belgique), (iiiii) du Bois Brûlé (Conteville, département de la Somme), (iiiiii) de la *E-Factory* de F.N. Pickett & Fils d'Audruicq (département du Pas-de-Calais) et (iiiiiii) Zweedorf (Mecklembourg-Poméranie, Allemagne), soit environ 13 BG.

Ces résidus apparaissent comme des matériaux granulaires, hétérogènes, d'un faciès cendreux à scoriacé, parfois d'aspect gras, noir et moiré, ou encore gris à vert olive lorsqu'ils renferment de grandes quantités de fragments de fusées (alliage Al/Zn/Cu oxydé). Pelliculaires (quelques centimètres d'épaisseur), ces résidus peuvent former une couche de plusieurs dizaines de centimètres de puissance. Les reconnaissances de terrain, montrent que ces résidus pourraient se subdiviser en deux catégories (i) des résidus autochtones, déposés au droit des BG où ils ont été générés et (ii) les dépôts allochtones, lorsqu'ils ont été déplacés et déposés à proximité des BG où ils ont été calcinés. Ces derniers dépôts pourraient aussi possiblement correspondre à des brûlages de finition.

Les archives documentent de façon précise et générique les méthodes et moyens de destruction des REG par brûlage dans l'entre-deux-guerres, mais sont avares en informations sur la nature et la conduite opérationnelle des brûlages, et en particulier sur la typologie et les quantités d'engins neutralisés, à l'échelle de chaque terrain de brûlage. La caractérisation de la nature, de la localisation et de la position, de l'état physique des éléments anthropiques et/ou d'origine pyrotechniques présents au droit des BG et/ou au sein des résidus de brûlage, ainsi que de la composition des cortèges d'éléments chimiques et de molécules organiques constituant ces matériaux, permet d'éclairer la connaissance des faits et pratiques de destruction de REG par brûlage de l'entre-deux-guerres. D'importants efforts analytiques furent consentis pour explorer la composition de ces résidus atypiques, considérant dans un premier temps, pour définir les panels analytiques à appliquer, les connaissances historiques sur la composition des matériels et matières de guerre et le comportement environnemental des éléments et substances organiques en question.

Cette recherche aux interfaces entre géosciences, histoire des sciences et techniques et histoire militaire, met en exergue, l'intérêt de la démarche de caractérisation approfondie, chimique et pyrotechnique, des pollutions historiques et des résidus de brûlage comme une source indirecte et originale de connaissances des pratiques historiques sur les sites de brûlage là où les archives font défaut. L'interprétation de ces géoindicateurs et l'expertise pyrotechnique complètent pertinemment les informations délivrées par les sources d'archives classiques.

Ainsi, des teneurs élevées à la fois en arsenic inorganique, en composés organo-arséniés dérivés des diphénylarsines, associées à des tessons en verre vert de fioles d'arsines vomitives témoignent de neutralisations d'obus allemands à *Croix bleue*. La présence concomitante de monochlorobenzène et de thianes résulte de la présence d'*Ypérites* au soufre allemandes tandis que le cortège constitué par le brome lixiviable, les composés bromés monoaromatiques et les dioxines et furanes bromées (PBDD & PBDF) est symptomatique de la présence dans les sols de restes d'agents lacrymogènes bromés (comme le *T-Stoff* allemand) et leurs sous-produits dérivés. La destruction de fusées d'artillerie allemandes est attestée par la présence dans les sols et les résidus par de fortes teneurs en zinc bien corrélées au cadmium, au cuivre et en moindre mesure au mercure (des amorces au fulminate). Enfin, l'étain est également présent à des teneurs anomaliques, localement très élevées (> 6 $gSn.kg^{-1}$ MS), dont l'occurrence pourrait s'expliquer par le déchargement d'engins de guerre à charge fumigène ($SnCl_4$ ou « Liqueur de Libavius ») ou de munitions à l'intrados étamé. Ce métal est aussi associé à de fortes teneurs en arsenic (ce métalloïde a aussi été utilisé sous forme $AsCl_3$ comme agent fumigène dans des munitions à chargement chimique).

La chimie de certains résidus de brûlage présente des caractéristiques de calcination à la fois de projectiles chimiques et à la fois de fusées d'artillerie ex-allemandes typiques de la fin de la guerre. Pourtant, les brûlages d'obus étaient toujours pratiqués sur engins au préalable désamorcés et ouverts à l'œil (ogive) ou au culot, c'est-à-dire dépourvus de leurs fusées / gaines détonateurs. Ces terrains auraient donc pu être exploités avec des séquences de brûlage spécifiques aux obus, d'autres visant spécifiquement les fusées.

Enfin, le terrain de brûlage d'Audruicq (*E-Factory* de F.N. Pickett & Fils) correspond vraisemblablement à une catégorie particulière de BG, sur lesquels aucun projectile, qu'il soit conventionnel ou chimique, n'aurait été brûlé compte tenu de l'absence de pollution métallique. Seules des traces d'explosifs y ont été détectées et quantifiées. Ce terrain accueillait des brûlages de poudres (ergols), poudres noires, explosifs et boues issues des installations de vidage par fusion à l'eau chaude. Par ailleurs Pickett y déchargea que des munitions britanniques.

La particularité des résidus de brûlage est leurs teneurs systématiquement anomaliques en dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF, PolyChloroDibenzo-p-Dioxines & PolyChloroDibenzoFuranes), localement en dioxines et furanes bromées (PolyBromoDibenzo-p-Dioxines & PolyBromoDibenzoFuranes). Les teneurs se sont révélées localement extrêmes (> 4 000 000 ng kg / MS (∑PCDD + PCDF)). Des composés organo-arséniés « exotiques » d'une grande diversité appartenant aux familles polyphénylées (di- et tri-phényls) et aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques arséniés (As-HAP) ont été mis en évidence dans ces résidus par des recherches originales et parfois quantifiés dans des résidus très marqués par l'arsenic.

Ces molécules n'ont jamais été intentionnellement synthétisées par l'industrie chimique; il s'agit de substances résultant de recombinaisons moléculaires de radicaux réactifs produits à partir de molécules mères hydrocarbonées en présence de chlore et/ou d'arsenic lors de phénomènes de combustion à basse température (combustion incomplète). Les PCDD &PCDF se forment ainsi majoritairement vers 450°C. Ces substances ont été mesurées à fortes teneurs en particulier dans des résidus renfermant (i) des fioles intactes vidées de leurs arsines contenant des résidus noirs goudronneux, (ii) des fioles déformées et partiellement fondues et (iii) des billes et galettes de verre vert totalement fondues. Il s'agit d'indications que ce verre a été porté au moins à sa température de ramollissement (~ 600°C), voire au-delà, jusqu'à sa température de fusion (> 1 500 °C).

La présence dans les sols naturels au contact des résidus de brûlage d'horizons rubéfiés (rouge brique), teintés par les oxydes de fer, constitue une autre indication des fortes températures auxquelles furent portés les sols et les résidus.

Le chargement des obus à *Croix bleue* ayant contenu ces fioles d'arsines fut donc soumis à un processus thermique dans des foyers au sein desquels régnaient de forts contrastes et gradients de température ce que semblent corroborer les rares documents d'archives décrivant les opérations de brûlage de ces engins : les foyers étaient allumés le soir puis laissés actifs sans surveillance durant nuit. Le lendemain, les inspections des munitions triaient les engins, séparant ceux totalement calcinés et déchargés, de ceux partiellement vidés et devant être repris par une nouvelle séquence de brûlage. PCDD, PBDD, PCDF, PBDF et PCB *Dioxin-Like* devaient se former durant toutes les étapes des séquences de brûlage, depuis la montée en température jusqu'à l'extinction et au refroidissement, mais leur production devait culminer durant la phase de refroidissement, lorsque les foyers atteignaient une température inférieure à celle de la pyrolyse et de la destruction des dioxines et furanes.

Cette émission aurait été rendue possible par l'excès de chlorures de diphénylarsines, dans les brassiers durant toutes la séquence de brûlage. Les chlorures de diphénylarsine (*Clark 1*) possèdent (i) une structure chimique très proche des PCDD & PCDF (correspondant à des groupements biphénylés oxydés), et (ii) des atomes de chlore. Les arsines constituent ainsi des précurseurs à la formation par pyrolyse imparfaite des dioxines et furanes. Les stabilisants des ergols solides nitrocellulosiques, comme les diphénylamines, possèdent aussi une structure chimique proche des PCDD & PCDF. Les deux sites de brûlage de munitions de la Seconde Guerre mondiale, d'ergols, et de matériels pyrotechniques contemporains, intégrés à cette recherche, possèdent des profils des teneurs en PCDD & PCDF qui ne s'écartent pas de ceux d'engins de 1914-1918. Enfin, d'autres molécules, plus simples, de moindre poids moléculaire, (comme le monochlorobenzène, les NAC, ou encore les sulfure d'éthyl dichlorées, ou *Ypérite*) ont pu être, en présence de chlore ou de brome, à l'origine de dioxines et furanes halogénées.

On constate sur la presque centaine d'échantillons analysés pour le dosage des PCDD & PCDF, une signature (rapport entre les teneurs en homologues) généralement dominée par les furanes (∑PCDF > ∑PCDD, ∑PCDF / (∑(PCDD + PCDF) > 70%) avec une prévalence des congénères bassement chlorés (TétraChloroDibenzoFuranes, TCDF), avec toutefois, sur certains BG des signatures singulières par des teneurs émergentes en congénères hautement chlorés (OCDF et OCDD), nécessitant pour leur formation un excès d'atomes de chlore. L'hypothèse du brûlage de chargement chimique et fumigène peut être avancée.

Les résidus de brûlage sont principalement marqués par les Eléments Traces Métalliques (ETM) avec des teneurs rarement rencontrées sur des sites et sols pollués : l'arsenic (As) sur les sites de destruction de munitions à arsines, le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et en moindre mesure le cadmium (Cd), le mercure (Hg) sur les *Burning Grounds* dédiés aux fusées d'artillerie, le plomb (Pb), l'étain (Sn). Elles excèdent le $g.kg^{-1}$ MS voire 100 $g.kg^{-1}$ MS pour As et Zn. Ces teneurs sont liées à la présence dans les résidus de fragments métalliques millimétriques, d'une fraction sorbée sur les éléments constitutifs des résidus et de minéraux arséniés néoformés. Les NAC et leurs sous-produits de transformation environnementale tout comme les sous-produits organo-arséniés n'ont été détectés qu'à l'état de traces (< $mg.kg^{-1}$ MS). D'une manière générale, les NAC détectés dans les résidus de combustion et dans les sols au droit et aux abords des BG possèdent une signature chimique dominée par le TNT, les DNT, les DNB, et leurs sous-produits de transformation environnementale, qui reflètent aussi la nature des chargements explosifs, en particulier ex-allemands. Les teneurs en PCDD & PCDF proches ou égales au $mg.kg^{-1}$ MS, au moins 1 000 fois inférieures à celles des ETM, sont exceptionnelles et rarement reportées dans la littérature scientifique.

Les métaux et métalloïdes libérés depuis les *casings* des obus et de leur chargement, et des fusées brûlées sur les mêmes sites se recombinèrent sous forme de phases minérales amorphes ou cristallisées néoformées. L'arsenic des arsines totalement décomposées (en As, H_2O, CO_2, HCl) s'oxyda et s'exprima sous forme d'arséniate (AsO_4^{3-}) de fer (issu des *casings* et/ou du milieu naturel), de cuivre, de zinc (issus des fusées) dans les résidus avec des habitus minéralogiques hérités des phases de montée et de descente des températures.

Les métaux, métalloïdes, PCDD & PCDF présents à des teneurs exceptionnellement très élevées dans les résidus de brûlage montrent une mobilité environnementale pourtant très faible du fait (i) de la très faible hydrosolubilité des molécules organiques polyaromatiques de haut poids moléculaire et des oxydes métalliques, (ii) du caractère planaire des composés aromatiques (Kd et K_{oc} très élevés) et (iii) de la capacité de sorption très élevée des résidus de brûlage liée à leur composition, riche en oxyhydroxydes de fer, et en éléments charbonneux granulaires finement dispersés. Cette particularité explique les écarts très importants constatés entre les teneurs obtenues sur des extraits après lixiviation à l'eau et celles après extraction aux solvants organiques. Une mobilité de certains polluants (PCDD, PBDD, PCDF, PBDF, Zn) vers les eaux de surface et leurs sédiments a été constatée dans l'environnement de certains BG. Elle est due à des entrainements mécaniques par ruissellement de particules de sols et de résidus, sur lesquelles les polluants sont sorbés, à la faveur d'épisodes de fortes pluies. Les pollutions associées aux opérations d'*Open Burning* sont peu ou pas mobiles et impactent globalement peu le milieu aquatique.

Les pollutions des sites de brûlage de munitions de l'entre-deux-guerres étudiés dans le cadre de cette recherche peuvent s'avérer spectaculaires par l'effet des polluants sur la végétation. Le site de la « Place à gaz » en forêt de Spincourt forme une clairière de 1 000 m^2, avec une surface noircie sur laquelle rien ne pousse. Rarement pollutions des sols sont si visibles. L'endroit a cristallisé sur lui, jusque dans les années 2010, toute la question laissée ouverte de la séquelle environnementale de la Grande Guerre.

<u>En environnement forestier,</u> là où les résidus de brûlage ont été abandonnés tels quels, les teneurs extrêmes en ETM se traduisent par l'absence de couvert végétal au niveau des zones de pollution les plus concentrées ; latéralement, les teneurs diminuant, la végétation colonise ces surfaces par des association d'espèces tolérantes, résistantes, qui se distribuent concentriquement selon les gradients des teneurs. Ce couvert reste d'une faible biodiversité. Les bryophytes (mousses) et lichens sont les plantes colonisant les matériaux les plus pollués, s'agissant de plantes rustiques d'une grande plasticité écologique, tirant leurs subsistances et nutriments de l'air et des aérosols. Elles sont accompagnées aux teneurs décroissantes par des graminées. Les sondages à la pelle mécanique réalisés au droit du site de la « Place à gaz » montrent que la surface de ce BG ne peut être qualifié de sol au sens pédologique du terme, car constitué de matériaux totalement anthropiques, s'assimilant à une couche de déchets dangereux générés par des procédés industriels d'éradication par brûlage de REG.

<u>En environnement agricole</u>, les teneurs en ETM des sols de surface sont moindres du fait de phénomènes de dilution et de dispersion des masses de polluants par le brassage sur [0-40 cm] des résidus avec les sols naturels à la faveur des labours. Le taux de dilution entre résidus et sols brassés est de 100 au droit de tranchées de brûlage à Rampont. Ces teneurs sont encore suffisamment élevées pour jouer négativement par leur phytotoxicité sur la croissance et le développement des plants (orge, maïs, etc.). Un transfert sélectif des sols vers les épis d'orge a aussi été démontré à Noire Fontaine (acide diphénylarsinique, TNT) et pour Pb des sols vers des champignons à la « Place à gaz ».

Les sites de destruction de munitions par OB sont d'extension très limitée (quelques centaines de m^2) et vraisemblablement peu nombreux comparativement aux sites de démolition par OD (plus de 70% des sites de destruction de REG identifiés, avec des terrains de démolition parfois étendus sur quelques hectares) au regard de l'inventaire historique dressé par le BRGM (2018) et des archives consultées dans le cadre de cette recherche. Les pollutions des sols associés, visibles, sont certes spectaculaires, mais sont très localisées et ne concernent que quelques rares sites. Se pose ici alors la question légitime de la représentativité des caractérisations des résidus et pollutions, des principales interprétations qui en découlent et des conclusions avancées, eu égard à celles de l'ensemble des sites de brûlage de l'entre-deux-guerres. Faute de connaître le nombre réel de sites d'OB de l'entre-deux-guerres et leur typologie, le degré de représentativité des éléments présentés dans ce qui précède ne peut être évalué mais peut être discuté. L'hypothèse selon laquelle les BG seraient avant tout une spécificité liée à la neutralisation des engins ex-allemands et que les éléments avancés dans cette recherche possèdent une dimension représentative semble plausible. Les pollutions associées aux opérations d'*Open Burning* sont peu ou pas mobiles et impactent peu le milieu aquatique.

Ces zones exposant en surface des teneurs très élevées, voire extrêmes, de polluants toxiques, CMR (Cancérigène, Mutagène, Reprotoxique) et persistants, peuvent constituer des milieux d'exposition directe et/ou indirecte, et nuire au libre usage des sols, agricoles comme forestiers. La découverte fortuite de pollutions sévères des sols agricoles en 2015, en lien avec les installations historiques de désobusage industriel Clere & Schwander, enclencha, dans un contexte socio-politique tendu, la réalisation de diagnostics des sols, des eaux et denrées alimentaires, pour en évaluer les risques. Ces spécificités distinguent ces sites pollués par OB des terrains d'explosion OD où les zones de pollution concentrées se situent en profondeur, à la base d'entonnoirs d'éclatement généralement remblayés par des matériaux peu ou pas pollués. Les résidus d'explosifs générés par OD sont plus mobiles que ceux par OB, car plus solubles et moins facilement sorbés sur les fractions minérales et organiques formant les matrices solides des sols.

Ainsi, les rares site de destruction par OB montrent des sols de surface extrêmement pollués qui constituent des milieux d'exposition à des polluants aisément accessibles n'affectant pas les eaux souterraines tandis que les nombreux sites de destruction par OD impactent préférentiellement les eaux souterraines en exposant en surface que des pollutions faibles à modérées (comparativement aux fonds géochimiques).

Les recherches historiques ainsi que les résultats des études sectorielles exposés dans ce manuscrit mettent en exergue deux situations susceptibles d'être à l'origine de zones de pollution concentrée et d'une dégradation durable et étendue des eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechniques

<u>La première est celle des zones de guerre de mines</u>, qui sont doublement complexes, car s'y combinent un environnement hydrogéologique anthropisé fracturé de géométrie inconnue, contrôlant le cheminement des eaux souterraines et d'infiltration, et un long historique dans lequel se mêlent des combats souterrains par la mine (à grands renforts d'explosifs, parfois se chiffrant à plusieurs centaines de tonnes) et des combats violents en surface pour la prise des hauteurs, usant notamment de moyens d'artillerie de tranchées ((per)chloratés). Des destructions en masse de REG furent parfois opérées dans ou à proximité immédiate des entonnoirs de mine durant la sortie de guerre. De telles opérations sont avérées (Courtes Chausses en Argonne, Cote 108 à Berry-au-Bac, etc.) ou peuvent être pressenties sans qu'il soit possible de l'affirmer au regard des données disponibles (Allencombe à La Chapelotte). Les détonations répétées sous terre comme en surface, totales ou partielles, contribuèrent à introduire sur ces secteurs géographiques très localisés, des résidus d'explosifs dans les sols et les couloirs de fracturation du massif rocheux, précisément là où s'effectuent les circulations préférentielles des eaux souterraines (Argonne, Vauquois) et l'infiltration des eaux météoriques ou de petites nappes perchées (La Chapelotte).

Des charges dysfonctionnelles abandonnées ainsi que des explosifs en vrac et autres matériels explosibles délaissés dans les systèmes de galeries profondes qui s'ennoyèrent peuvent aussi contribuer à marquer durablement les eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique. Cet environnement hydrogéologique localement fortement anthropisé ainsi que la présence de masses considérables d'explosifs directement exposées aux conditions environnementales forment un terreau très favorable à la genèse de pollutions des eaux souterraines durables et concentrées. (i) Les ions chlorate (de la *Cheddite*), la nitroglycérine (de la *Dynamite-Gomme*) ainsi que les ions perchlorate (avec un signature isotopique Atacama) (de la poudre noire) peuvent provenir de fourneaux français, (ii) l'aluminium, les ions nitrate et ammonium (de l'*Ammonal*) de fourneaux britanniques. L'empreinte des explosifs allemands constituant les fourneaux de mine est caractérisée par le TNT (et les isomères des ADNT qui en découlent), les isomères du DNT, les impuretés des DNT et TNT (des explosifs de sureté et des *Perdites*) ainsi que par les ions perchlorate (avec une signature isotopique synthétique) (des *Perdites*).

La seconde situation est celle des centres de destructions des Restes Explosifs de Guerre et des surplus de l'Artillerie. En effet durant la guerre et surtout dès novembre 1918, des consignes furent passées afin de faire procéder à la récupération des matières et matériels explosibles des munitions éparses, tirées (UXOs) ou non utilisées, qu'elles soient françaises, alliées ou encore allemandes, abandonnés au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Les matières explosibles initialement dispersées se retrouvèrent ainsi concentrées sur une aire géographique restreinte. Ces mécanismes de rassemblement et d'accumulation de masses, initialement dispersées sur de vastes secteurs géographiques, sur des zones d'extension très restreinte, génèrent des situations où sont rassemblées les conditions pouvant déboucher sur la formation de zones de pollution concentrée, si ces masses sont déconfinées, extraites de leurs contenants, et introduites dans les sols. Dans le cas des REG, ceci s'opère lors des destructions des engins par *Open Detonation* (OD) en masse. Les ions chlorate, perchlorate et les NAC identifiés dans les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France ne constituent pas les polluants caractéristiques des résidus des terrains de destruction par brûlage qui par ailleurs ne sont pas mobile et n'impactent pas ou peu le milieu aquatique. L'impact d'autres techniques de déchargement des munitions (comme le *wash-out*), pratiquées sur quelques sites d'échelle industrielle, est inconnu. Les retours d'expérience étrangers ainsi que les études originales exposés dans le présent manuscrit montrent que la pratique de destruction de munitions obsolètes, hors services, en surplus par OD est polluante. Le site de Cramont Conteville apporte une preuve irréfutable que ces sites de destruction contribuent au marquage perchloraté des eaux souterraines par des ions perchlorate (de synthèse) issus des explosifs, accompagnés par des NAC dont la nature dépend des explosifs et munitions pétardés et de leur comportement environnemental.

Le report des localisations des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans le cadre de l'inventaire national du BRGM (parmi lesquels une grande majorité de sites de destruction par OD) dans les grandes régions Hauts-de-France et Grand Est sur la carte de distribution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH (2011-2015) montre que l'empreinte perchloratée des eaux est bien mieux géographiquement corrélée à la répartition des sites de destruction de REG qu'aux anciennes lignes du front occidental.

Les sites de destruction et les EDCH marquées par les ions perchlorate sont majoritairement localisés à l'est de ces lignes dans ce qui était les zones des étapes et des armées d'occupation allemande, là où étaient situés les dépôts allemands que les troupes du *Reich* abandonnèrent en 1918 lors de leur retraite. Or, (i) les munitions ex-allemandes furent rassemblées puis systématiquement détruites dans l'entre-deux-guerres, ce qui signifie qu'un grand nombre (inconnu) de terrains de destruction démolirent des matériels et matières explosibles de confection allemande, (ii) les cortèges de NAC caractérisés à la faveur de cette recherche sont dominés par des composés entrant dans les formulation d'explosifs typiquement allemands (DNT, DNB, TNN).

Dans les secteurs non concernés par la guerre de mines (comme au Lingekopf) et les destructions massives de REG, des composés d'origine pyrotechniques, de nature et en quantités susceptibles de dégrader durablement la qualité des eaux souterraines, ont pu être introduits dans les sols à la faveur de tirs d'Artillerie, en particulier dans les secteurs intensément pilonnés. Le nombre de projectiles déflagrés (détonation de bas-ordre) ou restés inertes (UXO) introduits dans les sols consécutivement à des tirs est directement proportionnel aux quantités tirées et serait de l'ordre de 25% des engins vectorisés. Cette recherche montre que ces projectiles dysfonctionnels peuvent être des pourvoyeurs de composés d'origine pyrotechniques dans les sols en exposant instantanément (après déflagration) ou de façon différée (après une phase de corrosion des *casings* pouvant exiger des centaines d'années) tout ou partie de leur chargement à l'environnement. (i) Les engins épars et isolés détruits par pétardement, (ii) les projectiles tirés et déflagrés et (iii) les projectiles tirés et non explosés sont possiblement à l'origine d'un marquage diffus des eaux souterraines par les ions perchlorate et les autres composés d'origine pyrotechnique à des concentrations moindres que celles constatées dans les secteurs de guerre de mines et de destruction massive des REG.

L'empreinte perchloratée et pyrotechnique des eaux souterraines dans le quart nord-est de la France apparaît donc majoritairement allemande et liée aux pratiques guerrières et à la démilitarisation des sols dans la sortie de guerre. Elle est une résultante de (i) l'usage et/ou de l'abandon durant la Première Guerre mondiale par les armées en campagne de quantités considérables (par centaines de milliers de tonnes) de matériels et de matières explosibles, en particulier dans les secteurs de guerre de mines fortement disputés, mais aussi (ii) des destructions à des échelles industrielles de quantités considérables de Restes Explosifs de Guerre et surplus d'engins obsolètes, en particulier ex-allemands dans l'entre-deux-guerres. Des sites hybrides où des terrains de guerre de mines furent réinvestis post-conflit par des chantiers de destruction de Restes Explosifs de Guerre, ont aussi été identifiés. Ces ions perchlorate, très mobiles et persistants dans les eaux, peuvent être issus de la dissolution de résidus d'explosifs d'une grande diversité introduits dans les sols et/ou le milieu souterrain, mais aussi provenir en partie (dans des proportions impossibles à estimer dans l'état actuel des connaissances) de terrains où ils purent s'emmagasiner consécutivement à l'usage de nitrates du Chili naturellement perchloratés notamment importés comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière dans le nord de la France.

La Grande Guerre a donc marqué durablement les eaux souterraines. Ces recherches ne sont pas exhaustives compte tenu (i) du nombre restreint (ii) de la nature (forages et sources EDCH, sources non captées, etc.), des points échantillonnés et ne donnent qu'une vision partielle de la distribution spatiale et de la dynamique temporelle de l'empreinte historique de la Grande Guerre sur les eaux souterraines. Il s'agit toutefois de la première démonstration, établie sur des méthodes et moyens scientifiques originaux combinés à des recherches historiques approfondies, du lien entre un conflit majeur interétatique et une dégradation durable de la qualité des eaux souterraines. Cette recherche montre l'absence de dégradation de la qualité des sols de surface à l'échelle des anciens champs de bataille de la Grande Guerre par des éléments métalliques initialement présents dans les engins de guerre tirés (principalement As, Cu, Cd, Hg, Pb, Zn). Localement, de légers dépassements du fond géochimique local ont été mesurés (effet pépite). Les quantités de métaux formant plus des 4/5e en masse des engins tirés, ne se décomposant pas au moment des détonations, sont sans aucune commune mesure avec les quantités de résidus d'explosifs imbrûlés introduits dans les sols. Les masses seraient pour le 75 mm de l'ordre de 7 * 1 000 kg en métaux, soit 7 tonnes pour un bombardement de 1 000 engins. Plus les tirs sont concentrés, plus la densité des impacts est élevée, plus la masse de résidus d'explosifs et de métaux par unité de surface et de volume est élevée, plus les teneurs moyennes sont importantes. Cette connaissance de la densité des tirs à l'échelle locale (et non à celle souvent publiée des champs de bataille) est essentielle, mais non documentée.

Aucune recherche portant sur le marquage de ces sols par les autres constituants organiques ou inorganiques persistants (dont ceux formant les ergols solides, explosifs et leurs adjuvants) n'a été identifiée. Les pollutions des sols les plus sévères, extrêmes et spectaculaires, sont très localisées sur de rares sites majoritairement à l'écart des anciens champs de bataille et ont été générées par des opérations de liquidation de tonnages considérables de REG et autres surplus de guerre, hérités de la guerre, dans l'entre-deux-guerres.

Résumé, conclusions générales et perspectives

La revue bibliographique sur l'état de l'art sur l'empreinte environnementale actuelle des conflits modernes, montre que les études et recherches sur le sujet restent rares, locales, parcellaires, et incomplètes. Aucune étude ou recherche n'a abordé dans la littérature scientifique la question du marquage des compartiments environnementaux par les composés persistants, autres que les métaux, entrant dans la formulation des explosifs, pourtant massivement produits et utilisés durant la Première Guerre mondiale. Les études et recherches sur les séquelles environnementales des conflits majeurs du XXe siècle, dont de la Grande Guerre, sur la ressource en eau et ses usages font défaut. Aussi paradoxal que cela puisse paraître, l'empreinte environnementale de la plus grande des grandes guerres industrielles, 1914-1918, est restée en dehors du champ des rares recherches sur les séquelles environnementales des conflits modernes et contemporains. L'impact environnemental rémanent de ce conflit constitue un champ de la recherche quasiment vierge de connaissances et inexploré.

Pourtant, un faisceau d'éléments environnementaux et historiques semble montrer que l'hypothèse de l'existence d'un marquage environnemental actuel spécifique aux évènements de la Grande Guerre mais aussi à des opérations de destruction de Restes Explosifs de Guerre hérités de la guerre dans l'entre-deux-Guerres semble plausible. Restes Explosifs de Guerre (REG) désigne dans le droit international et humanitaire actuel « *les munitions non explosées et les munitions explosives abandonnées* » selon le Protocole de l'Organisation des Nations Unies (ONU) relatif aux Restes Explosifs de Guerre adopté le 28 novembre 2003.

Les ARS et l'ANSES démontrèrent entre 2011 et 2015 la présence inattendue dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH) d'ions perchlorate (ClO_4^-) le long et aux abords des anciennes lignes de front mais aussi dans des secteurs qui n'avaient pas été directement concernés par les évènements de la Grande Guerre. L'usage d'explosifs perchloratés durant 1914-1918 fut aussi invoquée. Le rapprochement causal entre 1914-1918 et l'empreinte perchloratée régionale dans le quart nord-est de la France s'opéra en 2012 par la proximité des anciennes lignes du front occidental (entre la mer du nord au nord et la frontière franco-suisse au sud) avec la distribution spatiale des ClO_4- dans les EDCH sans que des recherches historiques et/ou environnementales aient pu l'établir avec certitude. Le lien éventuel entre 1914-1918 et ClO_4^- dans les eaux souterraines restait à établir. Le site de la « Place à gaz » dans le nord meusien raconte une autre histoire, méconnue, celle de la sortie difficile de la Grande Guerre et la liquidation des REG, chimiques et conventionnels, abandonnés par millions au terme des hostilités. Si la présence des ions ClO_4^- dans l'eau du robinet est invisible, les pollutions des sols de la « Place à gaz » sont spectaculaires du fait de l'absence totale dans cette clairière de végétation du fait des effets phytotoxiques des polluants métalliques introduits dans les sols par des activités de brûlage d'obus chimiques dans l'entre-deux-guerres. L'endroit a, depuis les années 2000, cristallisé sur lui toute les questions restées sans réponses de la séquelle environnementale de 1914-1918. Les recherches historiques sur l'origine de la « Place à gaz » débouchèrent sur la découverte d'un site de destruction de REG bien plus vaste encore, dans le canton de Spincourt, en environnement agricole. La découverte fortuite de pollutions sévères des sols agricoles contraignit les autorités à prendre des mesures radicales et drastiques de protection de la population avec mise sous séquestres des parcelles impactées. Cette situation de crise joua comme un révélateur de lacunes (i) historiques sur ces activités post-conflit et (ii) environnementales sur la genèse de ces pollutions et leurs caractéristiques.

L'intérêt pour la dimension environnementale de la Grande Guerre fut réactivé à la faveur du Centenaire de la Première Guerre mondiale.

(i) Identifier, (ii) qualifier l'empreinte environnementale de la Première Guerre mondiale sur le front occidental puis (iii) comprendre les liens de causalité (phénomènes et mécanismes) entre la Grande Guerre, la sortie de guerre et ce marquage environnemental et les mécanismes en jeu à l'origine de sa dynamique spatiale et temporelle constituent les problématiques et objectifs centraux de la présente recherche. Le croisement et la mise en interlocution originale des disciplines de l'histoire et de l'environnement s'imposent pour espérer répondre à ces nombreuses questions, avec en premier lieu celle de l'origine des ions perchlorate dans les eaux de boisson dans le quart nord-est de la France, et évaluer en quoi et, le cas échéant, comment ils participent à l'empreinte digitale (*Fingerprinting*) des pollutions historiques héritées de la Première Guerre mondiale, qu'il s'agisse des faits de guerre bornés à 1914-1918, et/ou de la liquidation de la guerre par les opérations de destruction à grande échelle des Restes Explosifs de Guerre qui débordèrent la conclusion du 11 novembre 1918. Les découvertes fortuites de pollutions en lien avec 1914-1918 et leurs conséquences sociétales, économiques et financières, mettent en exergue des besoins de recherche sans équivoque qui dépassent le champ des travaux strictement académiques. Le chercheur en environnement cherche dans le passé ce qui peut expliquer le présent, pour mieux anticiper l'avenir. Il partage cette préoccupation commune avec le monde de l'Histoire, celle du temps « *L'Histoire en effet n'est pas une réflexion sur le passé, mais une réflexion sur le temps. Et sur le temps, les historiens n'ont que peu de choses à négocier, voire rien, en fait*[2096] ».

Ce travail de doctorat vient couronner une longue trajectoire d'études et de recherches trans- et inter-disciplinaires amorcées dès 2009 et conduites aux interfaces poreuses entre histoire environnementale et militaire et les géosciences, depuis des usines de guerre aux sites de destruction industrielle des REG via le champ de bataille. Les communications et valorisations qui en découlèrent contribuèrent à donner un nouvel éclairage sur la Grande Guerre et participèrent à l'ouverture disciplinaire dans l'écriture de l'histoire de la Grande Guerre qui fut une des caractéristiques des du Centenaire « *Ce se sont plus seulement les historiens qui s'intéressent à 1914-1918 mais aussi les autres sciences sociales et les sciences dures. Avec la dimension transnationale, l'interdisciplinarité est une composante majeure de la recherche sur la Grande Guerre*[2097] ».

[2096] Audoin-Rouzeau, S, Saint-Fuscien, E. (2021). *Emprises de la guerre. La guerre transmise. Sensibilité*. *op. cit*, p.11.

[2097] Gilles, B. 2022). *Service d'archive et bibliothèques publiques pendant le Centenaire au cœur de la diffusion scientifique* In Weinrich, A., Patin, N. (2022). *Quel bilan scientifique pour le Centenaire de 1914-1918 ?* Centre international de recherche de l'Historial de la Grande Guerre. Sorbonne Université Presses, Paris. p. 256.

To the final history of that war it will, however, be necessary to add a chapter concerning the matters […] of de-munitioning[2098]

La Grande Guerre de l'Artillerie

Débutée follement, à pied et à cheval, la Première Guerre mondiale s'acheva soudainement 52 mois plus tard avec des chars et des avions. La guerre mobilisa la science au front et accéléra, puis paracheva les mutations profondes des moyens de l'Artillerie entamées durant la seconde moitié du XIXe siècle, que ce soit pour les canons dans toute leur diversité, que pour l'arme par essence de l'artilleur, l'obus, et en corollaire l'art et la manière de le vectoriser avec précision sur sa cible, la balistique. Les boulets pleins, les tubes lisses et les propulseurs à base de poudre noire laissèrent place aux projectiles oblongs chargés d'explosifs extrêmement stables et puissants (dont le trinitrotoluène (TNT, *Tolite*) et le trinitrophénol (*Mélinite*)) propulsés par des ergols nitrocellulosiques au travers de tubes à rayures hélicoïdales qui imprimait une rotation axiale aux projectiles dont le vol était ainsi stabilisé.

Lorsqu'éclata à l'été 1914 la Première Guerre mondiale, l'Artillerie était toujours considérée dans la doctrine militaire française comme une arme de soutien de l'Infanterie, voire un obstacle à la manœuvre, reléguée au second plan par la suprématie de l'offensive à outrance par des charges d'infanterie et de cavalerie à découvert. En août 1914, la bataille des frontières, en Lorraine et en Belgique, vint apporter un sanglant et cinglant démenti à cette croyance. Les Français butèrent sabre au clair contre l'Artillerie la plus puissante au monde et les mitrailleuses. Après l'avancée allemande jusqu'à 40 km de Paris, la retraite en bon ordre des Français, puis, à la faveur d'une erreur stratégique du commandement d'une armée allemande galvanisée par ses succès, après la contre-offensive française de la Première bataille de la Marne, Allemands et Français firent l'amer constat que leurs plans offensifs respectifs (Plan Schlieffen d'une part et Plan XVII d'autre part), misant sur une guerre éclair à l'issue victorieuse en quelques semaines, venaient d'échouer. Mais aucune des parties n'avait imaginé de plan B et aucun stock, ni de munitions, ni de poudres et explosifs, n'avait été constitué dans la perspective d'un conflit qui pouvait durer. En septembre 1914, la consommation inattendue de munitions mit les Etats-Majors devant le fait accompli : trouver le moyen d'approvisionner l'Artillerie en projectiles ou arrêter la guerre. Ce fut alors l'ordre de mobilisation générale des industries, pour convertir les productions du temps de paix en celles du temps de guerre. Après les derniers soubresauts de la guerre de mouvement et la course à la mer achevée dans la « mêlée des Flandres », le front se figea au point mort à l'hiver 1914-1915 par le renoncement à l'offensive et la recherche du salut par la défensive, marquant la fin de la guerre de mouvement et le début d'une longue et éprouvante guerre de position (la guerre des tranchées). Une victoire ne pouvait être espérée que par la reprise du mouvement et en corollaire par l'ébranlement, par une percée, de ce mur défensif. Les grands assauts d'infanterie inspirés du XIXe siècle avaient échoués. Les quartiers généraux misèrent sur la puissance de feu et le pouvoir d'attrition des nouveaux moyens de l'Artillerie qui s'imposa dès 1915 comme la cheville ouvrière de la stratégie d'usure et de rupture pour espérer déstabiliser le front puis le percer. La nouvelle physionomie de la guerre contraignit aussi l'Artillerie à adapter tactiques et matériels aux combats de la guerre obsidionale. Durant la Première Guerre mondiale, le nombre de pièces, les précisions, les cadences de tir et les portées de l'Artillerie ne cessèrent de croître au même titre que la puissance des projectiles, la diversité des calibres et des chargements (explosifs, à balles, chimiques, incendiaires, fumigènes, etc.). Inaugurés en Champagne en 1915 avec une dizaine de milliers de tirs, les bombardements massifs de l'Artillerie, préparant, accompagnant ou neutralisant les assauts, culminèrent en violence lors des « hyperbatailles » de 1916, à Verdun, dans la Somme puis en 1918 où plusieurs millions d'engins furent vectorisés sur l'ennemi en quelques heures, parmi lesquels en moyenne plus de 30% de munitions chimiques au chargements agressifs aux effets sournois.

[2098] National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair. *F.N. Pickett & Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives, op. cit*. p. 25.

Matériels et matières explosibles et agressives de la Première Guerre mondiale

Matériels et matières explosibles et agressives, munitions et projectiles étaient des objets manufacturés constitués d'éléments et de substances chimiques. La nature de ces constituants ne cessa d'évoluer durant la guerre en réponse (i) aux facilités ou difficultés d'accès aux ressources minérales et énergétiques dont les cartes avaient été rabattues par la rupture des liens commerciaux et le blocus maritime britannique sur les mers, (ii) aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées, (iii) aux capacités des outils industriels et (iiii) aux coûts de production. Globalement toutes les parties usèrent des même explosifs essentiellement nitrés et/ou nitratés mais dans des proportions variables. La majorité des explosifs étaient constitués de NAC (*NitroAromatic Compounds*, explosifs nitrés) polaires (2,4,6-trinitrophénol ou *Mélinite*), apolaires (2,4,6-trinitrotoluène, TNT ou *Tolite*, isomères du dinitrotoluène (DNT), isomères du dinitrobenzène (DNB) et isomères des di- et tri-nitronaphtalènes (DNN, TNN)) généralement mélangés au nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) dans les explosifs nitratés. Certains belligérants engagés militairement sur le front occidental usèrent aussi d'explosifs spécifiques à leur camp.

Les travaux originaux réalisés dans le cadre de cette recherche montrent que les sels de perchlorate entraient dans la composition (i) d'explosifs explicitement et sciemment perchloratés (comme les explosifs *« P »* français ou les *Perdites* allemandes), et, de façon inattendue, (ii) dans des explosifs nitrés nitratés et ergols solides nitrocellulosiques standards, en impuretés présentes intentionnellement ou non dans ces formulations. Seule l'Artillerie française usa de manière massive et systématique durant toute la guerre d'explosifs (per)chloratés (à base de sels de chlorate (ClO_3^-) ou de perchlorate (ClO_4^-) paraffinés) pour charger grenades et bombes d'artillerie de tranchée ou encore les fourneaux de guerre de mines, les explosifs nitrés nitratés perchloratés (*Perdites*) étant apparu dans l'armée allemande qu'à la fin de la guerre comme explosif de secours. Les formulations perchloratées sont quasiment absente des chargements britanniques. Les Allemands chargèrent quant à eux, contrairement à leurs adversaires, certains projectiles de leur artillerie lourde et de campagne avec des DNT, DNB et des TNN. Les pénuries en explosifs standards réglementaires en Allemagne conduisirent les industriels à utiliser des explosifs civils des mines et carrières, des explosifs de secours (comme les explosifs perchloratés à la fin de la guerre), voire des déchets de production de TNT (dans les grenades à manche), ce qui a été confirmé par des analyses au laboratoire sur plus de 70 échantillons de poudres et explosifs réalisées dans le cadre de cette recherche. L'origine synthétique des ions perchlorate a été prouvée sur quelques échantillons. La présence de perchlorates dans certains explosifs nitrés nitratés n'a trouvé aucune explication historique (présence intentionnelle ou accidentelle). L'usage, l'abandon, la destruction d'explosifs qu'ils soit explicitement perchloraté ou non peuvent donc être à l'origine d'introduction dans les sols d'ions perchlorate.

Durant le conflit, des quantités considérables de matériels et matières énergétiques et agressives furent produites, stockées puis utilisées sur le front occidental à des échelles et quantités inédites. Plus d'un milliard de tirs d'artillerie lourde et de campagne et au moins autant de jets de grenades et de tirs d'engins de tranchée, totalisant environ 10 millions de tonnes, chargés et propulsés par trois millions de tonnes de produits chimiques (poudres et explosifs). Les explosifs explicitement perchloratés, spécificité française, représentaient moins de 12% des matières énergétiques produites et importées en France durant la Grande Guerre et certainement encore moins si on rapporte les tonnages (inconnus) utilisés par toutes les parties au tonnage total de poudres et explosifs. Jamais encore auparavant tant d'armes aussi puissantes n'avaient été utilisées à une telle échelle.

Mais voilà, 25% ne fonctionnèrent pas ou dysfonctionnèrent (incident de tir), déflagrant à l'impact (détonation de bas-ordre) sans détoner intégralement, projetant de la sorte une partie du chargement autour du point d'impact. Les engins tirés non explosés (*Unexploded Ordnance*, ou « *UXO* ») pour certains, ricochèrent et restèrent gisant en surface, d'autres s'enfoncèrent sous terre provoquant une pollution pyrotechnique des champs de bataille pilonnés.

Emergence de problématiques inédites au cœur du conflit. Récupération et désobusage.

Avec l'usage massif à une échelle inédite de matériels de guerre de genres nouveaux, des problématiques bien connues des artilleurs, mais restées avant la Grande Guerre et durant les guerres préindustrielles mobilisant l'artillerie, en marge des préoccupations des états-majors et des autorités civiles, prirent elles aussi des dimensions inédites, contraignant les Etats-Majors à mettre en place des organisations nouvelles et des moyens pour répondre spécifiquement à ces facettes inusitées inattendues des guerres modernes. Les restes de guerre des conflits antérieurs étaient constitués de boulets pleins, de projectiles rudimentaires chargés de poudre noire déflagrante peu puissante. Les munitions de 1914-1918 étaient puissantes. Les épaves de guerre conservaient leur puissance d'explosion bien après avoir été tirées ou abandonnées. Ces REG constituaient (i) une perte sèche de matières, de poudres et explosifs inopérants, (ii) une menace pour les troupes au sol mais aussi pour les civils lorsqu'ils purent regagner les zones anciennement bombardées. Cette « pollution pyrotechnique » entravait les usages ordinaires des sols, et en particulier, agricoles. Dans le contexte d'hyperconsommation de munitions et d'approvisionnements critiques pour répondre aux besoins quantitatifs et qualitatifs des armées en campagne, les quartiers généraux de toutes les parties belligérantes s'organisèrent alors pour récupérer au cœur de la guerre matières et matériels abandonnés mais avec des motivations qui différèrent, mais s'entendirent pour combattre un ennemi commun : le gâchis.

Ces préoccupations de récupération et de consommation raisonnée des munitions apparurent très tôt dans la guerre sur fond de « crise des munitions ». La récupération fut encadrée dès octobre 1914 par des instructions du GQG au sein de l'Armée française pour débarrasser de leurs engins dangereux les territoires agricoles et très fertiles situés entre les rivières Marne et Aisne et libérés au terme de la première bataille de la Marne. Les artilleurs des escouades de récupération procédèrent alors à l'identification des engins, puis à leur tri, séparant ceux devant être détruits sur place de ceux, transportables, pouvant être réutilisés avec ou sans réfection, les engins appartenant à cette dernière catégorie étant alors dirigés vers des centres de réfection ou des dépôts dits de « rassemblement ». Les engins intransportables étaient « pétardés » (*Open Detonation* (OD)) sur place (*Blow-In-Place (BIP)*) par l'apposition sur les engins d'une charge explosive « donneuse » qui en fonctionnant transmettait la détonation par « sympathie ». Le pétardement pouvait viser des munitions éparses ou regroupées pour être détruites en tas (fourneaux). La récupération (*Salvaging*) était de prime importance pour les corps expéditionnaires britannique (*British Expeditionary Force*, BEF) et américain (*American Expeditionary Force,* AEF) du fait de l'éloignement de leurs bases d'approvisionnement. Enfin les Allemands, se livrèrent en zone occupée à un pillage et un vandalisme méthodique, institutionnalisé, afin de puiser dans les usines et autres bâtiments, en France et en Belgique, de quoi pallier les insuffisances de leurs ressources géologiques en métaux non ferreux et aux difficultés d'approvisionnement imposés par le blocus maritime britannique. La récupération alliée fut d'abord réalisée par des unités combattantes, aidées par des civils et des Prisonniers de Guerre (PG). Des primes incitatrices indexées sur la nature des objets récupérés furent distribuées par stimuler la récupération. Avec l'accélération des travaux de remise en état des sols agricoles à compter du second semestre 1916, le besoin de renforcer les moyens de la récupération s'imposa. Le 18 août 1917 fut signé un décret visant la création d'un Service spécial de la récupération, rattaché au Ministère de la Guerre, chargé de la remise en état du sol « des régions reconquises sur l'ennemi ». Le Service spécial se substitua progressivement aux personnels des armées. Revinrent à l'autorité militaire les tâches strictement militaires comme la récupération et la destruction des munitions actives (désobusage). Les très nombreuses instructions qui encadraient ces opérations et *modus operandi*, aux contours flous, et qui formèrent le terreau des dysfonctionnements de cette récupération militaire, furent *in fine* simplifiées début 1918 par le Grand Quartier Général (GQG) qui s'assura aussi auprès de ses alliés, dans un souci de cohérence, que des dispositions similaires avaient été prises par les *Salvage* pour pacifier les sols de France sous contrôle allié.

Si la nécessité de la récupération et du désobusage des sols pendant le conflit était consensuelle au sein du GQG, la réalisation de ces travaux au cœur même de la guerre suscita le débat. Cette question d'affecter des moyens humains et matériels à des tâches non combattantes surgit à chaque fois que des gains territoriaux étaient effectifs (1914) ou susceptibles de l'être (1916).

Abandon de Restes Explosifs de Guerre et genèse des surplus de guerre en 1918

Avec la reprise de la guerre de mouvement à l'été 1918 et le déplacement vers le nord-est des lignes de front, la récupération dut à nouveau s'adapter à la nouvelle physionomie de la guerre, par notamment une réaffectation des tâches de la récupération des unités combattantes vers, lorsque les opérations militaires l'autorisaient, des personnels militaires non combattants. La récupération apparaît, dans la dynamique de la guerre de 1918 puis dans la perspective d'une cessation prochaine des hostilités, comme une variable d'ajustement des approvisionnements de l'Artillerie pour garantir, sur un front mouvant, la constance d'une puissance de feu décisive tout en cherchant à limiter autant que faire se peut l'approvisionnement par du matériel nouveau depuis les arrières. Le GQG avait parfaitement conscience que ces opérations d'enlèvement des REG syn-conflit étaient, faute de moyens, non seulement superficielles mais aussi très partielles. Puis, les quantités de REG brutalement enflèrent encore. Dès septembre 1918, les Allemands en retraite abandonnèrent leurs dépôts de munitions de leurs anciennes zones des armées, entre la rivière Marne et la frontière belge, précipitant aussi des projectiles dans les fossés, plans et cours d'eau, à l'est des anciennes lignes de front, pratiquant comme au printemps 1917 une tactique de la terre brûlée, minant, piégeant les dépôts de munitions qu'ils délaissaient. Les chantiers souterrains de guerre de mines furent aussi abandonnés avec parfois leurs stocks d'explosifs, comme en Argonne ou à Vauquois. Les quantités délaissées à la faveur de la retraite sont vraisemblablement conséquentes (au regard des rares archives collectées à ce sujet) mais restent encore inconnues dans cette phase de la guerre qui constitue toujours « un point aveugle » de la Grande Guerre. Ils délaissèrent aussi en l'état, sur le territoire anciennement annexé d'Alsace Lorraine, une fois la guerre conclue, leurs nombreux et vastes dépôts de munitions conformément aux clauses de l'armistice du 11 novembre 1918.

Cet effondrement subit des capacités de combat de l'Allemagne ne généra pas uniquement des accumulations de REG au front et dans les anciennes positions allemandes de France et de Belgique, elles concernèrent aussi les arrières.

Lorsque les Alliés entamèrent leur contre-offensive majeure à l'été 1918, ils ignoraient tout de l'état de l'Armée allemande et de ses capacités à combattre. Le GQG espéraient mettre un point final à la guerre à la fin du premier semestre 1919, à la faveur d'une offensive décisive en Lorraine. Ainsi, lorsqu'à la grande surprise des Alliés, l'armée du *Reich* collapsa début novembre 1918 et qu'enfin les Allemands demandèrent l'armistice, les approvisionnements en munitions continuèrent dans les arsenaux alliés, appuyés par une industrie de guerre lancée à plein régime. Le corps expéditionnaire britannique en France et en Belgique (BEF) avait accumulé des tonnages très élevés de munitions dans de vastes dépôts des anciennes zones des armées du secteur britannique, en particulier dans le Nord et le Pas-de-Calais. Ce tonnage a été estimé aux alentours de 350 000 tonnes. Les surplus américains en France s'élèveraient à plus de 250 000 tonnes principalement stockés le long des voies stratégiques, sur la méridienne reliant les ports de l'Atlantique (Bordeaux, Saint-Nazaire, etc.) au GQM (*Great Quartermaster*) américain à Chaumont (Haute-Marne). Ces matériels de guerre devinrent soudain, avec l'arrêt subit des hostilités, excédentaires par rapport aux besoins réels des armées. L'Allemagne défaite connut aussi sur son territoire de telles accumulations dans les usines de production et dépôts de munitions. Munitions et explosifs était des matières et matériels métastables à utiliser de suite. Leur conservation sur de longues période de temps est toujours problématique. Les chargements des engins non utilisés se dégradèrent d'autant plus vite que leurs conditions d'entreposage étaient inadaptées. Ces surplus en excès, obsolètes et hors services se commuèrent ainsi avec le temps, au même titre que les REG non récupérés en « déchets de guerre ».

Rebattre les cartes de la géographie des Restes Explosifs de Guerre

Durant la guerre, les REG étaient localisés sur et aux abords des lignes de front et au droit des territoires reconquis sur les Allemands ; leur densité était directement proportionnelle à la durée et à l'intensité des bombardements, variables selon les secteurs. Les sols de ces zones furent « pollués » par des UXO de tous calibres, de toutes les nationalités et confectionnés à différentes périodes de la guerre, auxquels s'associèrent des matériels en tous genres abandonnés, non tirés, à la faveur de la confusion des combats, épars, en amas, en petits dépôts dans les abris et tranchées ou dans des caches. Les opérations de récupération, de rassemblement de matériels abandonnés durant la guerre, puis l'inflation des surplus de guerre et la retraite allemande entamée à l'automne 1918 façonnèrent une nouvelle géographie des restes de guerre au moment de la cessation des hostilités.

De forts tonnages de matériels et matières explosibles avaient été accumulés dans les arrières (ERGMu, Etablissement de Réserve Générale de Munitions), usines et ateliers de chargement, dépôts intermédiaires à l'ouest du front pour les français comme pour les britanniques tandis que des quantités considérables, difficiles à estimer avaient été abandonnées à l'est par les Allemands. Ces munitions de la fin de la Première Guerre mondiale, n'avaient plus rien à voir avec celles de 1914. Les explosifs et la composition des munitions notamment allemandes se diversifièrent significativement pour pallier aux pénuries en matières premières (recours aux *ersatz*, explosifs de secours, explosifs civils détournés à des usages militaires, usage de déchets de production, etc.). Enfin, anecdotiques en 1915, la proportion de munitions chimiques et d'artillerie lourde ne firent que croître jusqu'à la fin de la guerre jusqu'à atteindre pour l'artillerie chimique 30 à 35% des arsenaux.

Enjeux et problématiques des Restes Explosifs de Guerre à la cessation des hostilités

Voilà ce que légua à l'hiver 1918, lorsqu'enfin se turent les canons, le temps de guerre des militaires, cette guerre industrielle et de machine inédite, aux survivants, sinistrés, aux autorités et administrations civiles qui devaient se réinventer dans ce temps, entre l'armistice du 11 novembre 1918 et l'entrée en vigueur du Traité de paix en janvier 1920, cette parenthèse, cette antichambre qui n'était plus vraiment la guerre mais pas encore pleinement la paix. La situation de la France et de la Belgique était alors en novembre 1918 totalement inédite. L'Artillerie raya des cartes et des paysages en quelques mois des villages entiers comme l'aurait fait plusieurs dizaines de siècles d'abandon et d'érosion. Elle causa 70% des pertes durant la guerre, laissant derrière elle des payages aplatis, désolés, des océans de trous et de bosses. Si mobiliser et faire la guerre était indéniablement complexe et traumatique, sortir d'un cataclysme de l'ampleur de 1914-1918 et démobiliser les hommes, l'industrie et les pensées, se sont avérés plus complexes encore. La Grande Guerre industrielle déboucha sur une sortie de guerre industrielle traversée par l'urgence et les nécessités des reconstructions (agricole, industrielle, domestiques), du relèvement des ruines et le poids des deuils. Sur le chemin sinueux et chaotique menant des destructions aux reconstructions, se dressaient des obstacles incontournables : les Restes Explosifs de Guerre par millions constellant les anciens champs de bataille et plus de 1 700 000 tonnes de munitions accumulés en surplus dans les dépôts. Libérer les sols de ces engins était impératifs car constituait un prérequis indispensable à la remise en état des sols agricoles engagées en première urgence par l'Etat (via le STPU), à la remise en route des usines encombrées par les caches de munitions allemandes, à la réouverture des voies de chemins de fer saturées de milliers wagons chargés de munitions. Il fallait aussi libérer les terrains occupés par les dépôts de munitions, réquisitionnés d'office durant la guerre, et restauter la libre jouissance de la propriété privée.

Mais avec les travaux de remise état des sols, d'autres engins, cachés dans la boue, les abris et tranchées furent exhumés et firent encore enfler le tonnage des REG qui ne cessèrent d'augmenter lorsque les premiers labours furent entrepris.

Solder la guerre, c'était aussi liquider les représentations de la guerre. Ces montagnes de munitions, buttes témoins du temps de guerre, agirent par leur matérialité et leur présence imposée, de façon anxiogène au sein d'une population civile qui n'aspirait qu'à une nouvelle normalité. Les nombreux accidents, souvent mortels, toujours invalidants, relayés par la presse, impliquant des civils au contacts d'engins épars non explosés et au contact des dépôts, vinrent dramatiquement rappeler aux autorités civiles comme militaires garantes de la sécurité, de la nécessité mais aussi de l'impériosité d'éradiquer ces quantités inédites de restes de guerre. Enfin, l'urgence était aussi celle de mobiliser pour nettoyer les sols de la France meurtrie, la main d'œuvre militaires française et alliée et celle des PG avant la libération de leurs obligations militaires, leur rapatriement et, pour les PG, leur renvoi en Allemagne.

Repenser la récupération et le désobusage à des dimensions industrielles dans l'entre-deux-guerres

La récupération et le désobusage figurent parmi les parents pauvres de l'historiographie de la sortie de guerre, tout juste évoquée en quelques mots et en entrefilets dans les écrits relatant les reconstructions (agricole, industrielle, urbaine, etc.), les réparations, les démobilisations, les sphères du deuil. Pourtant ces opérations devinrent à la cessation des hostilités capitales et de prime importance, car constituaient un prérequis incontournable aux reconstructions.

En 1914, personne ne s'était préparé à rentrer dans une guerre d'un genre nouveau, en 1918, personne n'avait imaginé avoir à débarrasser et liquider ce qu'elle avait laissé.

Les opérations de récupération, des REG, de liquidation des matériels et matières explosibles et agressifs datant de la Grande Guerre suivirent une trajectoire chaotique, par des ajustements opérationnels, organisationnels et techniques permanents. Elles se déroulèrent en trois temps. La récupération et le désobusage furent d'abord (i) militaires et opérés par l'Armée française et ses alliées, en France et en Belgique (de fin 1918 à fin 1919) dans le cadre plus général de l'interventionnisme étatique direct et urgent pour la remise en état des sols, puis elle devint (ii) privée par l'entremise d'entreprises sous contrat avec l'Etat (et des structures temporaires du temps de guerre spécialement créé à cet effet, comme le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks), via deux types de marchés (entre début 1920 et fin 1929) et enfin (iii) sous un même format mais avec un marché unique (de début 1930 au début de la Seconde Guerre mondiale). L'année 1920 vit la bascule, d'un désobusage et d'une récupération militaires désinteressés destinés à reconstruire et protéger les populations vers une activité industrielle plus soucieuse de rentabilité, de recettes et de profitabilité que du bien-être et de la sécurité des sinistrés. Les militaires démobilisaient et les PG retounaient chez eux, laissant les civils seuls face à ce que la guerre leur avait légué. La recherche du profit par « *Iron hravest* » de la Grande Guerre fut une conséquence d'un nouveau sursaut technologique. La mise au point des fours à réverbères Martin-Siemens, devenus pleinement opérationnels, permettaient dès lors de fondre et recycler des vieilles ferrailles pour en faire des aciers performants. Les anciens champs de bataille et plus encore les surplus de guerre (ne nécessitant aucune récupération et aucun rassemblement majeur) se commuèrent alors en « gisements » de matières premières secondaires valorisables, dont les reconstructions avaient grandement besoin, et qu'il fallait récupérer. Les REG changèrent de statut, passant de déchets de guerre (au sens de la Loi du 15 juillet 1975), à celui de matières recyclables et profitables avec en premier chef les métaux (acier, fonte, cuivre, zinc, plomb, etc.). La solution pour poursuivre la récupération et le désobusage malgré l'absence de main d'œuvre militaire fut trouvée : l'Etat délégua cette tâche par adjudications à des entreprises privées. Les archives consultées dans le cadre de cette recherche n'abordent pas la question des critères selon lesquels ces entreprises furent jugées compétentes par l'Etat et retenue par adjudication, sachant qu'il n'y avait probablement pas de précédent pour ce type d'opérations avant 1919. Possiblement, pour parer à l'urgence, les entreprises les plus offrantes et affichant les meilleures garanties de réussite furent retenues pour ces opération exceptionnelles, motivant la contractualisation selon une procédure de gré à gré.

Deux types marchés furent conclus dans chacune des 1er, 2e, 6e Régions militaires, là où les duels d'artillerie furent particulièrement intenses et violents et où, par conséquent, le désobusage porta sur des tonnages de projectiles très importants, (i) les marchés dits « des Régions Libérées » qui visaient la récupération des vieilles ferrailles inertes, c'est-à-dire ne renfermant aucune matière explosible et (ii) les marchés dits « du Temps de Guerre » qui visaient explicitement les Restes Explosifs de Guerre. Le choix des entreprises et le contrôle de l'exécution des marchés furent confiés à la Direction de l'Artillerie (DA) et plus précisément aux commandements des Parcs d'Artillerie Régionaux (PAR) des Régions militaires concernées. Le premier marché militaire « du Temps de Guerre » fut passé en gré à gré le 19 mai 1920 par le commandant l'Artillerie de la 1re Région, avec la société F.N. Pickett & Fils pour la démolition de munitions ex-allemandes entreposées dans la forêt de Trélon (département du Nord).

Les produits de la récupération, matières propriétés d'Etat, étaient cédés aux entrepreneurs contre le versement au Trésor d'une redevance à la tonne, indexée sur la nature des métaux, et suivant des barèmes propres à chaque type de marché. Les redevances applicables aux marchés « du Temps de Guerre » étaient moins élevées que celles « des Régions Libérées ». La coexistence de deux contrats, dont l'exécution était assujettie à deux tarifications de redevances différentes, mais visant une seule et même marchandise, les vieux métaux, devint rapidement problématique. Ainsi aucun organe de contrôle, de police, aucune sanction pour le non-respect des règles, n'étaient prévus aux contrats. Les clauses des cahiers des charges et les marchés souffrirent en effet de faiblesses et d'imprécisions se traduisant par des difficultés de contrôle et de gouvernance par les instances militaires en charge de la bonne exécution des contrats.

La gestion du désobusage par voies contractuelles comportait un ensemble de procédures auxquelles les services de l'Artillerie n'étaient pas nécessairement préparés. S'ensuivirent (i) des récupérations illicites (ii) de nombreuses fraudes par l'imputation d'un marché sur l'autre, (iii) de nombreux accidents, généralement mortels, de récupérateurs imprudents, inconscients, non formés au désobusage et (iiii) des récupérations sélectives ne visant que les engins les plus rémunérateurs sans prises de risque, le reste étant caché, enfouis. De nombreux avenants furent produits en chaine, afin d'ajuster les prix aux fluctuations des cours des métaux, et vinrent encore complexifier la gestion des contrats. La majorité des contrats arrivèrent tant bien que mal à échéance en 1928 et 1929, date à laquelle des entreprises comme Berge, Savot Frères & Cie et Meignie & Meyer se partagèrent à elles trois tous les contrats les plus lucratifs, à savoir deux du « Temps de Guerre ». L'organisation contractuelle fut alors repensée en 1929, avec notamment (i) le passage à un marché unique, (ii) la mise en place de procédures de mise en concurrence d'entreprises présélectionnées par la DA pour leurs compétences et les garanties financières et (iii) l'instauration d'un organe de police (la Gendarmerie). Mais la période du passage au régime des marchés uniques coïncida aussi autour de 1930 avec celle de l'amorce d'une conjoncture extrêmement défavorable pour les récupérateurs et désobuseurs, avec d'abord la crise économique mondiale, qui vit s'effondrer les cours des métaux, puis l'amenuisement du stock de matériel potentiellement récupérable au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Seules survécurent à cela dans les années trente les entreprises possédant les reins financiers les plus solides et les périmètres de récupération les plus étendus, c'est-à-dire les anciens titulaires des marchés militaires.

L'entreprise Savot Frères & Cie était encore active à Coucy-le-Château (département de l'Aisne) en 1937. Cette entreprise élargit son périmètre de récupération aux autres ferrailles qui étaient sans lien avec les munitions pour pouvoir pérenniser son activité, mais dut probablement mettre un point final à son activité en 1938 suite à la révélation d'activités illicites (la livraison d'armes de 1914-1918) en lien avec le mouvement complotiste et terroriste (CSAR, Comité Secret d'Action Révolutionnaire). Les dernières traces identifiée dans les archives faisant état d'opérations de désobusage industriel sous contrat datent de 1941 et la destruction de munitions par l'industriel arrageois Léon Berge à Fampoux (département du Pas-de-Calais).

Parallèlement au nettoyage des anciens champs de bataille restait en suspens la question de la liquidation des surplus de guerre dont la problématique, débordant le cadre géographique des lignes de front, concernait tout le territoire métropolitain dans ses frontières de 1914, mais aussi au-delà, les territoires anciennement annexés d'Alsace-Lorraine, l'Allemagne, occupée et comme libre, et la Grande-Bretagne.

Cette histoire de la liquidation des surplus de 1914-1918 est européenne. Ces démolitions d'échelle industrielle furent opérées selon des dispositions contractuelles analogues à celles visant le désobusage des anciens champs de bataille que ce soit en France, en Belgique, dans les anciens territoires annexé d'Alsace-Lorraine recouvrés en novembre 1918 (*Reichsland Elsass-Lothringen*, devenu Territoire d'Alsace-Lorraine (TAL)), en Allemagne occupée (par les Alliés) en rive gauche du Rhin ou Allemagne libre, par contractualisation avec des entités privées avec des organes d'Etat dédiés à la liquidation des stocks : (i) le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks (dépendant du Ministère des Finances) en France, (ii) le *Disposal Board* en Grande Bretagne, (iii) la Commission Centrale de Récupération (CCR) en Belgique, et (iiii) le *Reichsverwertungministerium* en Allemagne. Les entreprises, concurrentes en France, se regroupèrent en syndicat en Allemagne où le contrôle des démolitions fut placé sous celui des armées françaises, britanniques et américaines dans leurs secteurs respectifs et par l'IMKK (*Interallierte Militarische Kontrol Kommision*) (Commission Militaire Interalliée de Contrôle, CMIC) et ses trois sous-commissions en zone libre. L'IMKK fut mise en place en octobre 1919 pour s'assurer, par des contrôles militaires, du bon respect des obligations du désarmement selon les exigences du Traité de Versailles. La démilitarisation contrainte de l'Allemagne était la finalité de la liquidation des REG en Allemagne dans l'entre-deux-guerres. L'armée allemande fut bien évidemment écartée du processus. Les opérations en Allemagne débutèrent dès 1919, par le rassemblement des munitions par des entreprises privées sur des dépôts et sites industriels bien identifiés, et par d'importants mouvements transfrontaliers de munitions, pour approvisionner notamment les armées alliées engagées militairement plus à l'est contre les bolcheviques ou encore soutenir militairement des forces hostiles aux bolchevicks, en Pologne et en Tchécoslovaquie. L'AEF transféra en Allemagne, depuis ses grands dépôts du *Salvage* en Meuse, des munitions pour être démolies à proximité de Coblence et rapatria aussi aux USA des engins ex-allemands pour des expérimentations. Des munitions françaises furent aussi expédiées en Allemagne pour doter l'Armée du Rhin, d'autres furent cédées à la Tchécoslovaquie et à la Pologne. 1920 fut l'année de l'apogée des démolitions en Allemagne, tant par les tonnages détruits que par le nombre d'entreprises actives. Cette accentuation des démolitions de munitions en 1920 fut possiblement une conséquence de l'entrée en vigueur du Traité de Versailles le 10 janvier 1920, le non-respect, constaté dès le 31 mars 1920, des clauses de ce dernier sur la démilitarisation de l'Allemagne et le possible renforcement du contrôle des opérations par l'IMKK. Les Alliés hâtèrent aussi possiblement les démolitions en prévision d'une démobilisation progressive des corps expéditionnaires américains et britanniques. Les Américains se trouvaient aussi dans une situation paradoxale, d'avoir à appliquer les exigences d'un traité qu'ils n'avaient pas ratifiés.

De l'autre côté de la frontière de 1914, dans le TAL, l'éblouissement tricolore des premiers instants de novembre 1918, avec l'entrée en Moselle et en Alsace de l'Armée française, laissa place à une déception des très hautes attentes, à une morosité, voire à une défiance à l'égard de l'administration imposée par Paris qui semblait faire fi des singularités linguistiques et culturelles de ces territoires.

Une administration transitoire, avec à sa tête le Commissaire Général de la République, fut installée à Strasbourg. Un « malaise alsacien-lorrain » vint rapidement infester la société en Moselle mais surtout et plus intensément encore en Alsace à partir du printemps 1919. La situation administrative entre 1919 et 1925 resta complexe, confuse du fait de l'imbrication des prérogatives, responsabilités et compétences des autorités civiles et militaires d'une part et l'interpénétration du droit français central et du droit local (dont au niveau communal de législations héritées de l'administration allemande) d'autre part. Les chevauchements réglementaires et les incohérences décisionnelles étaient inévitables. C'est dans ce contexte que durent être opérées les évacuations et/ou les destructions des Restes Explosifs de Guerre. Dans les 7e et 20e Région militaires (comprenant les anciens champs de bataille en montagne des Hautes-Vosges), les combats intenses d'artillerie n'intéressèrent que ponctuellement des zones d'étendue relativement restreinte, et, contrairement aux autres Régions militaires, la DA ne jugea pas nécessaire de recourir à des contrats vers des entités privées. Le désobusage fut pris en charge directement par les PAR.

Les champs de bataille des sommets vosgiens ne furent ainsi que très partiellement désobusés, l'essentiel des efforts du GQG fut ciblé sur le rassemblement et la liquidation des dépôts essentiellement ex-allemands situés sur certains cols et en plaine (dépôts du *Munitionsanstallt 3 à* Illkirch et du *Hartwaldlager* au nord-est de Mulhouse). Les accidents qui émaillèrent ces activités furent récupérés à des fins politiques par l'opposition de gauche (SFIO) en Alsace en pointant la défaillance d'un gouvernorat jacobin qui se serait défaussé de ses responsabilités et aurait incité la recherche du profit au détriment de la sécurité des ouvriers.

En Moselle, la liquidation des grands dépôts du Bois de l'Hôpital et celui du Bois de Lorraine tardèrent du fait de réticences et de l'opposition à l'ouverture du chantier de désobusage de la Société Lorraine de Produits Industriels (SLPI) des autorités civiles locales (Hospices de Metz). La situation devint rapidement critique. Malgré les mises en garde des autorités, notamment par le général Berthelot, face au danger que représentaient ces dépôts, des incendies et explosions accidentelles s'y produisirent provoquant (i) des mouvements de panique au sein des populations angoissées et (ii) des protestations des autorités civiles locales contre l'inaction de l'administration transitoire. Pour sortir de l'ornière, en Moselle, le Ministère de la Guerre trancha. Plusieurs dizaines de milliers de tonnes de munitions chimiques et conventionnelles furent transférées à l'été 1921 du territoire de Lorraine en Allemagne, en secteur sous contrôle militaire français, pour être démolies dans l'usine de destruction de Kelsterbach, à proximité de Francfort-sur-le-Main (Land de Hesse), exploitée par un consortium franco-allemand (impliquant la SPLI sous contrat), suite au refus catégorique des autorités messines locales (Hospices de Metz) d'autoriser l'exploitation de l'usine SPLI, pourtant en cours de construction, initialement projetée au Bois de l'Hôpital, au sud-est de Metz.

Mais il est un industriel qui sans conteste fit de la récupération une véritable industrie, visant des tonnages bien au-delà de ceux qui préoccupèrent ceux du TAL. Le britannique Francis Norman Pickett s'installa en France et créa son entreprise sous la raison sociale F.N. Pickett & Fils, qui devint à compter de 1920 la plus grande entreprise britannique de droit français et un géant du désobusage industriel. Il racheta au *Disposal Board* plus de 350 000 tonnes de surplus britanniques en dépôts en France en ex-secteurs britanniques, puis obtint, après les avoir rassuré sur ses capacités, des contrats avec l'Armée française pour la démolition de dépôts ex-allemands (à Trélon, Liessies (département du Nord)) et avec la CCR pour la liquidation du centre de rassemblement de Westroozebeke (Flandre occidentale, Belgique). Il exploita avec une main d'œuvre très hétéroclite de près de 4000 personnes plus de 14 usines, débutant avec la *C-Factory* de Trélon en 1920 et achevant son aventure industrielle en 1928 avec la « Place à gaz » dans le département de la Meuse. L'ingénieur officier artilleur russe, Michael Kostevitch, chef de la sécurité au sein de la maison Pickett prôna une véritable Taylorisation de la neutralisation des munitions pour en extraire en toute sécurité un maximum de matières secondaires valorisables. Un procédé ou un train de tâches spécifiques à chaque type de munition à décharger furent préconisés.

Les désobuseurs industriels, qu'il s'agisse de F.N. Pickett, de Clere & Schwander, de Bouxin furent tous confrontés à de très nombreuses difficultés techniques, administratives et économiques, conjoncturelles, en lien avec le contexte socio-politique de la sortie de guerre et la crise économique. L'absence de cadre d'une administration civile à la recherche d'une nouvelle organisation, affirmant sa nouvelle suprématie longtemps évincée par l'omnipotence militaire, pesa certainement pour expliquer le cadre dans lequel le désobusage et la liquidation des surplus furent exécutés. Mais Pickett subit aussi en tant que britannique d'autres pressions, car écoulant sa marchandise récupérée en France sur le marché anglais. Les pressions socio-politiques (par voie de presse) et économiques (embargos) virent des autorités françaises en réaction avec les différends franco-britanniques sur les montants et modalités de réparation de guerre allemande. Il exploita à perte puis l'entreprise F.N. Pickett & Fils fut déclarée banqueroute le 7 juillet 1932.

Il est vraisemblable que ses méthodes aient été adoptées comme des standards par les donneurs d'ordre du désobusage industriel en France dans l'entre-deux-guerres, des méthodes pour certaines encore en vigueur aujourd'hui en matière de rebutage et démantèlement d'engins de guerre obsolètes : (i) désamorçage par le dévissage de l'ensemble fusée et gaine détonateur à l'ogive ou au culot, (ii) déceinturage (récupération du zinc et du cuivre), (iii) déchargement des explosifs par fusion à l'eau chaude (*wash-out*), (iiii) décapitation au maillet et vidage des billes de Pb-Sb des obus à balles (*Shrapnels*), (iiiii) brûlage à l'air libre (*Open Burning* (OB)) en puits (*burning pits*) ou en tranchées (*burning trenches*) des obus explosifs et chimiques à chargement liquide ou solide (arsines des obus à *Croix bleue*) et (iiiiii) perçage et vidage des obus chimiques à chargement liquide et gazeux avec infiltration des toxiques dans le sols ou neutralisation (dans des fours, tours de lavage, etc.). Les fusées étaient brûlées dans des tranchées ou grillées dans des fours. L'étain des toxiques de guerre, les nitrates d'ammonium, les explosifs qui répondaient aux exigences réglementaires, étaient recyclés vers respectivement l'industrie de la soie, les engrais et des usages civils des explosifs (mines et carrières, agriculture). Les vieux métaux étaient quant à eux refondus (acier, laiton, plomb, zinc, cuivre). Les engins indémontables de façon profitable et en toute sécurité étaient pétardés ou coulés. Il s'agit sans aucun doute de la toute première opération de recyclage industriel à grande échelle struccturée selon un cahier des charges mais avec en contre partie l'identification de matériels « improductifs » à éliminer, sous terre ou dans les océans.

Les activités de démolition des engins de la Grande Guerre suivirent un cheminement sinueux et chaotique, inévitable face à la nouveauté et à l'ampleur de la tâche, fait d'ajustements techniques et contractuels selon une logique de planification accidentelle, de tâtonnements, de *trial and error* expérimentaux, le tout placé sous le sceau de l'urgence. Les opérateurs de ces liquidations se lancèrent dans des aventures industrielles qu'aucun retour d'expérience ne pouvait sécuriser. Les organisations, méthodes et moyens de neutralisation et de récupération des matières restaient à inventer pour parer au plus urgent, pour les industriels, d'abord pour tirer un maximum de profit des démolitions, puis si possible, dans un contexte économique se dégradant, pour trouver à minima un équilibre financier. Désintéressé et mené dans l'intérêt général et public, le désobusage fut à compter des années 20, motivé par et organisé pour des fins lucratives, selon des considérations coûts / bénéfices de recherche de profit. N'étaient démolis dans un but de récupération des matières constitutives des engins de guerre que les matériels pour lesquels les recettes tirées des reventes des matières secondaires excédaient les coûts de déconstruction. Les matériels jugés trop risqués à démonter eu égard aux bénéfices pouvant en découler étaient aussi écartés du processus de récupération. Ces déchets de guerre furent alors définitivement abandonnés par coulage terrestre ou maritime ou encore enfouis. D'autres furent détruits par pétardement. L'agrégation de données chiffrées relatives aux quantités démolies dans l'entre-deux-guerres conduit à une estimation réaliste de plus de 2 000 000 de tonnes. On rappelle ici qu'un ordre de grandeur de 10 millions de tonnes a pu être avancé dans cette recherche concernant le tonnage de munitions tirées majoritairement sur le front occidental et que les surplus dans l'immédiate sortie de guerre s'élèveraient à 1 700 000 tonnes. Avec un taux de dysfonctionnement des munitions de 25%, le tonnage tiré non explosé se situerait aux alentours de 2 500 000 tonnes.

Le tonnage démoli représenterait donc à minima 20% du tonnage tiré sur le front occidental et 47% du tonnage des surplus et Restes Explosifs de Guerre tirés.

Les zones géographiques où furent opérées ces démolitions industrielles étaient principalement celles concernées par les grandes offensives et les violents duels d'artillerie, à savoir les 1er, 2e et 6e Régions. Elles totalisent à elles trois près de la moitié du tonnage démoli. Le tonnage considérable détruit par F.N. Pickett & Fils s'élèverait à 434 640 tonnes, soit plus du tiers du tonnage total détruit. Environ 200 sites où furent détruits des matériels et matières explosibles dans l'entre-deux-guerres ont été identifiés à la faveur d'un inventaire, non exhaustif, réalisé à la demande du Ministère en charge de l'Environnement entre 2015 et 2018, qui se répartissent pour l'essentiel dans les trois Régions militaires citées ci-avant mais aussi sur l'ensemble du territoire métropolitain, et en particulier au niveau des Etablissements de Réserves Générales de Munitions (ERGMu) et sur ou à proximité de sites de production. Les régions Hauts-de-France (44% des sites) et Grand'Est (49% de sites) rassemblent à eux seuls près de 93 % des sites de destruction de munitions identifiés.

Presque 10 ans furent nécessaires pour reconstruire mais pendant plus de 30 ans des industriels s'affairèrent aussi liquider les surplus et restes de guerre accumulés en France, Belgique, Allemagne et en Grande Bretagne au terme de la Grande Guerre. Le désobusage des anciens champs de bataille de la Grande Guerre ne fut pas mené jusqu'à son terme lorsque la Seconde Guerre fut déclarée. Les dernières traces d'activité de ces désobuseurs datent de 1941 avec le chantier Berge de Fampoux, dont le terrain d'explosion dut être déplacé à la demande des autorités militaires allemandes *(Kreiskommendatur* d'Arras). La récupération et le désobusage industriels sous contrat visant les engins de la Grande Guerre cessa avec la Seconde Guerre mondiale. Mais, il fallut apporter des garanties aux Commissions Allemande et Italienne d'Armistice (CAA, CIA) que, l'armement ancien susceptible d'être réutilisé face à la *Wehrmacht* était neutralisé.

Figure 443 : Neutralisation de munitions anciennes de conception ex-allemandes de la Première Guerre mondiale en Macédoine (secteur de Bitola). La photographie a été habillée de motifs représentant des silhouettes d'avions biplans de 1914-1918 et de Zeppelin, obsolètes, lorsque survint la Seconde Guerre mondiale. L'auteur de ces dessins signe et date au 30 août 1939, soit quelques jours avant les ordres de mobilisation générale et l'entrée de l'Europe en guerre. A droite un personnage en arme surveille[2099].

[2099] https://macedonia1912-1918.blogspot.com/2017/02/unexploded-bombs-and-bullets-ww1-legacy.html Unexploded bombs - WW1 Legacy in Mariovo region, Macedonia

Aujourd'hui encore, les démineurs de la Sécurité civile (DGSCGC, Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises) et leurs homologues belges du SEDEE (Service d'Enlèvement et de Destruction d'Engins Explosifs), évacuent et détruisent tous les ans des centaines de tonnes de munitions anciennes (400 à 750 tonnes / an toutes guerres confondues) découvertes et mises à l'affleurement à la faveur de travaux agricoles, de terrassements, de curages d'étangs ou de cours d'eau. Selon ces professionnels, des centaines d'années seront encore nécessaires avant d'en venir à bout de cet héritage de fer légué dans nos sols par cet évènement paroxystique de la violence guerrière que fut 1914-1918, orchestrée par l'Artillerie, sur le front occidental.

L'usage, l'abandon, puis la destruction des matériels et matières explosibles et agressives durant la guerre mais aussi dans l'immédiate sortie de guerre, comme exposé dans ce qui précède, eurent des conséquences environnementales et laissèrent des traces dans les sols et les eaux que les outils métrologiques, analytiques comme isotopiques, performants actuels sont capables de mettre en évidence.

Ions perchlorate et les cortèges de composés accompagnateurs d'origine pyrotechnique dans les eaux

Les études « diagnostic » visant l'occurrence de résidus d'explosifs menées au niveau national et régional dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine (EDCH), pilotées par l'ANSES entre 2020 et 2022, furent complétées dans le cadre de la présente recherche par des études approfondies et sectorielles (combinant des approches analytiques, isotopiques et historiques, incluant des reconnaissances de terrain) afin (i) d'améliorer l'état des connaissances sur la qualité des eaux marquées par les ions perchlorate et (ii) d'établir de possibles liens de causalité entre les faits et pratiques militaires durant la guerre et/ou les opérations de liquidation des REG post-conflit et l'empreinte perchloratée des eaux souterraines. Ces études portent sur (i) les secteurs du Lingekopf et de La Chapelotte dans le massif des Vosges, de l'Argonne, de Vauquois en Meuse, de Suippes dans la Marne et (ii) les puits de Cramont (département de la Somme) et de Neufchâtel-sur-Aisne (département de l'Aisne). Les eaux (souterraines, de surface, de sources et celles de galeries de guerre de mine ennoyées) échantillonnées ont été analysées pour la recherche systématique des ions chlorate (ClO_3^-), perchlorate (ClO_4^-), nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) et plus ponctuellement des anions et cations majeurs. Les NAC ont été dosés par le LHN selon des protocoles identiques à ceux mis en œuvre lors de la campagne nationale exploratoire de l'ANSES de 2020-2021.

Enfin, des protocoles originaux ont été appliqués pour échantillonner sélectivement les ions ClO_4^- pour l'analyse au laboratoire (Université du Delaware, USA) des abondances des isotopes stables de O, Cl dans ClO_4^-. Ces analyses permettent de discriminer, sur la base des signatures isotopiques $\delta^{37}Cl$ / $\delta^{18}O$ et $D^{17}O$ / $\delta^{18}O$, une origine synthétique (comme pour les explosifs explicitement perchloratés) ou naturelle de ClO_4^-, notamment en lien avec la présence de sels de perchlorate dans les engrais anciens à base de nitrates du Chili (Atacama). Ces mesures de « *Forensie*[2100] » environnementale ont été environnées par des mesures effectuées sur (i) des eaux marquées en France et à l'étranger par des pollutions en ClO_4^- concentrées (industrielles) et diffuses, (ii) des sols fortement pollués en ClO_4^-, (iii) des effluents d'électrosynthèse actuels des $NaClO_3$ et $NaClO_4$, (iiii) des explosifs français et allemands datant de la Grande Guerre. Ces données furent complétées par un vaste jeu de données issu des travaux de recherche de Neil Sturchio (Université du Delaware) concernant (i) des perchlorates de synthèse (ii) des perchlorates naturels de type Atacama, et (iii) des perchlorates naturels provenant d'autres zones arides de par le monde.

[2100] Recherches et outils permettant de déterminer l'origine et/ou la datation des pollutions environnementales.

Ces recherches démontrent l'existence, au moins locale dans le quart nord-est de la France, de l'occurrence de composés d'origine pyrotechnique typiques des matières énergétiques massivement produites et utilisées durant la Première Guerre mondiale. Ces cortèges sont formés de composés inorganiques (oxyanions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-), possiblement nitrates (NO_3^-)) et organiques (familles des NAC). Les concentrations mesurées oscillent pour les NAC, selon les secteurs et les composés entre quelques ng.L^{-1} à près de 14 000 ng.L^{-1} (source du lavoir à Vauquois). Pour les ions perchlorate, les concentrations s'inscrivent dans une large gamme, depuis des concentrations proches des limites de quantification (0,5 µg.L^{-1}) à 123 µg.L^{-1} (source du Four-de-Paris, Argonne). Les ions chlorate ont aussi été localement quantifiés à des concentrations pouvant s'élever jusqu'à 142 000 µg.L^{-1} (Fontaine Notre Dame, Vauquois).

Quels que soient les secteurs étudiés, les cortèges de composés identifiés dans les eaux par les analyses au laboratoire sont proches ou identiques, constitués par les composés (i) persistants dans les conditions physico chimiques habituellement rencontrées dans les sols et aquifères et (ii) les plus mobiles, du fait de leur solubilité mais surtout de leur propension à n'être pas ou peu retenus par sorption par les matrices solides des sols et des aquifères. Il s'agit des ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-), qui possèdent un comportement de traceur parfait (en migrant à la même vitesse que l'eau dans laquelle il est dissout) et certains NAC parmi lesquels les isomères du dinitrotoluène (DNT) (et notamment les isomères symétriques ortho-substitués comme le 2,6-DNT), les isomères du dinitrobenzène (DNB) et les isomères de l'amino-dinitrotoluène (ADNT) (métabolite de transformation réductive du 2,4,6-trinitrotoluène (TNT))

La nature de ces cortèges présents dans les eaux n'est pas le reflet des importances relatives des tonnages des différentes matières énergétiques produites et utilisées durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental mais celui du comportement environnemental différentiel des constituants des résidus d'explosifs: le TNT, l'explosif le plus utilisés, massivement notamment par les Allemands et les Britanniques, n'a été détecté qu'à l'état de traces et que très ponctuellement. Le 2,4,6-trinitrophénol, l'explosif standard réglementaire de l'artillerie française et aussi largement utilisé par les artillerie allemandes et britanniques, pourtant très soluble (NAC polaire), n'a pas été détecté tandis que les taux de détection les plus importants concernent les ions perchlorate qui pourtant représentaient moins de 1/5 des explosifs produits et utilisés.

La prévalence des DNT et DNB dans les cortèges de NAC signe une origine allemande des résidus d'explosifs. DNT, DNB furent utilisés pour le chargement de projectiles d'artillerie (DNB), d'artillerie de tranchée, grenades et fourneaux de guerre de mines. Ils n'entraient pas dans les formulations des explosifs français et britanniques. Les isomères du DNT sont les espèces dominantes lorsque les NAC ont été détectés. L'empreinte sur les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France serait essentiellement allemande. L'usage de sels chloratés pour la fabrication d'explosifs était une spécificité française (*Cheddite* ayant chargé des grenades, certains projectiles d'artillerie de tranchée de gros calibre (explosif S) et les fourneaux de destruction de la guerre de mines). L'occurrence d'ions chlorate dans les eaux (non javellisées, et ne présentant pas d'indices de biodégradation des ions perchlorate) signe donc une influence de résidus d'explosifs français.

Cette recherche historique et environnementale démontre que les ions perchlorate, lorsqu'ils possèdent une signature isotopique (des isotopes stables de O, Cl au sein de ClO_4^-) typique des ions de synthèse ($\Delta^{17}O$ proche ou égal à 0‰) sont issus de résidus d'explosifs anciens datant de la Première Guerre mondiale. Cette signature isotopique militaire ancienne n'est pas unique mais multiple avec des valeurs de $\delta^{18}O$ qui s'inscrivent dans un vaste spectre, entre des valeurs très appauvries (eaux souterraines de l'est rémois) (min : -30,4 ‰) et un maximum de -12 ‰. Cette dispersion des signatures synthétiques résulte de la signature isotopique de l'oxygène de la molécule d'eau des bains électrosynthétique, thermodépendante et donc variable selon la latitude, l'altitude et les saisons.

Les signatures synthétiques diffèrent donc avec la localisation des sites de production et le moment de constitution des bains d'électrolyse. Si une signature isotopique synthétique des ions perchlorate ne laisse planer aucun doute sur leur lien avec des résidus d'explosifs anciens de 1914-1918 (ces sels ne furent plus utilisés dans les explosifs post 1914-1918), l'approche isotopique ne permet pas de discriminer l'origine et la provenance de ces résidus d'explosifs dont ils sont issus.

Présents dans des formulations d'explosifs explicitement perchloratées (comme le Ch 86 / 14 et l'explosif « P ») ayant systématiquement chargé les projectiles d'artillerie de tranchée français, les explosifs perchloratés apparurent aussi dans l'Armée allemande à la fin de la guerre comme explosif de secours nitrés nitratés perchloratés pour charger les projectiles d'artillerie de tranchée et les fourneaux de guerre de mines (*Perdite, Perchloratite*, etc.) tandis que les Britanniques n'utilisèrent les sels de perchlorate que de façon totalement anecdotique. Par contre, ces ions perchlorate sont présents de façon inattendue dans certains ergols solides et dans des explosifs nitrés nitratés standards en impuretés, en particulier dans ceux ayant chargé les grenades à manches allemandes de la fin de la guerre, possédant des compositions atypiques (mélanges complexes de NAC mono-, di, tri-nitrés) possiblement celles de déchets de production du TNT.

L'échantillon provenant de Mainvilliers (Loiret, Beauce) est le seul présentant une signature isotopique franche de type naturel Atacama. Les ions perchlorate du captage de Neufchâtel-sur-Aisne présentent la particularité de résulter d'un mélange d'ions possédant une signature synthétique (2/3) et une signature naturelle Atacama. Toutefois, la présente recherche historique met en exergue qu'une signature isotopique des ions perchlorate de type Atacama n'est pas systématiquement synonyme d'une origine agricole dans le contexte historique français. Les nitrates du Chili naturellement perchloratés furent en effet massivement importés en France jusque dans les années 30 comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière, mais ces mêmes nitrates furent aussi utilisés pour produire l'acide nitrique nécessaire à la fabrication des explosifs, par sulfonitration des hydrocarbures pour la synthèse des NAC et/ou la fabrication du nitrate d'ammonium. A contrario, la production de nitrates de synthèse destinés à la fabrication des poudres et explosifs au moyen du procédé de fixation de l'azote atmosphérique à l'arc électrique (procédé Birkeland Eyde), durant lequel des conditions proches de celles concourant à la formation des ClO_4^- et nitrates dans la haute atmosphère sont reproduites, ce qui laisse entrevoir une probable signature isotopique O, Cl ces ClO_4^- (synthétiques) des nitrates (synthétiques) proche ou équivalente de celle des ions naturel du type Atacama.

Chlorate, perchlorate et NAC actuellement mesurés dans les eaux étaient des substances entrant dans diverses formulations d'ergols solides et d'explosifs qui, dans la grande majorité des cas, étaient isolés de l'environnement par des contenants métalliques des *casings* des munitions ou des étuis des cartouches. Les explosifs des charges de destruction (fourneaux) étaient quant à eux simplement emballés dans des papiers paraffinés puis conditionnés dans des caisses en bois. Les modalités d'introduction dans l'environnement des constituants des matières énergétiques furent donc étudiées afin d'établir un lien de causalité entre le marquage des eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique et les faits et pratiques militaires de la Première Guerre mondiale, les opérations de liquidation des Restes Explosifs de Guerre durant le conflit et surtout durant la sortie de guerre. Les explosifs confinés dans les projectiles ne peuvent être mis au contact de l'environnement par la disparition ou la rupture des *casings.* Celles-ci s'opèrent en premier lieu à l'issue des tirs.

Modalités d'introduction instantané des résidus d'explosifs dans les sols après détonation

Aucune étude portant spécifiquement sur les modalités d'introduction de matières énergétiques dans les sols et/ou les eaux souterraines en lien avec leur usage, leur stockage et leur destruction durant la Première Guerre mondiale sur le front occidental ou post-conflit n'a été identifiée dans la littérature scientifique publiée et consultée dans le cadre de la présente recherche. De nombreuses recherches ont été menées aux USA dans les années 2000 par l'*US Corps of Engineers* (*Department of Defence Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP)) sur les terrains d'exercice et champs de tir actifs, parfois anciens, afin d'appréhender, qualifier et quantifier (i) la production et la dispersion des résidus d'explosifs (imbrûlés) consécutivement aux détonations de munitions tirées (ii) les mécanismes et cinétiques de corrosion des *casings* des engins tirés non explosés (*Unexploded Ordnances*, UXOs) et (iii) les durées de vie des particules d'imbrûlés dans les sols et leurs cinétiques de dissolution. Ces recherches sur des champs de tir de munitions modernes permettent d'approcher, par analogie, les mécanismes en jeu susceptibles de mobiliser les constituants des chargements des munitions tirées sur les champs de bataille de la Grande Guerre vers l'environnement ainsi que leurs dynamiques spatiales et temporelles.

Ces recherches montrent que tous les régimes de détonation sont pourvoyeurs de particules d'imbrûlés dans les sols. Les substances chimiques solubles formant ces particules d'explosifs peuvent être mobilisées vers les sols et les eaux souterraines au contact des eaux météoriques par le phénomène de dissolution. Ces cinétiques de dissolution dépendent des conditions environnementales (pluviométrie, température, etc.), de la solubilité de chacun des composés présents dans les formulations d'explosifs, et de la nature des assemblages. Ainsi, même si les chlorates (ClO_3^-) et perchlorates (ClO_4^-) figurent parmi les sels les plus solubles, la cinétique de dissolution des explosifs (per)chloratés, bien qu'inconnue, est vraisemblable très faible du fait du mélange de ces sels avec de la paraffine (insoluble et hydrophobe). Ces fragments d'explosifs peuvent ainsi persister dans les sols sur de longues périodes de temps et libérer de faibles flux d'ions chlorate et perchlorate (exprimés par exemple en g / an / km^2) vers les eaux souterraines.

La grande majorité des projectiles tirés a normalement fonctionné comme escompté et a suivi un régime de détonation de haut-ordre (HOD, *High-Order Detonation*) durant lequel les engins ont été intégralement disloqués et leur chargement décomposé laissant un faible pourcentage d'imbrûlés résiduels estimé par les études nord-américaines à 0,001 % en poids du chargement initial. Ces particules solides qui ont été finement dispersées autour du point de détonation, mélangées avec les matériaux pédologiques, possèdent une granulométrie inférieure au millimètre et sont de fait rapidement dissoutes (en moins d'un an) au contact des eaux météoriques. Durant la Grande Guerre, le régime de détonation de haut-ordre fut suivi par environ 75% des projectiles. Les imbrûlés issus de ces détonations ne peuvent constituer, plus de 100 ans après l'arrêt des hostilités, des sources actuelles encore actives dégradant toujours la qualité des eaux souterraines.

25% environ des tirs d'artillerie sur le front occidental durant la Première Guerre mondiale se soldèrent par des incidents de tir, les projectiles en question connaissant alors soit une détonation partielle de bas-ordre (LOD, *Low-Order Detonation*) soit un dysfonctionnement total à l'origine de la « pollution pyrotechnique » des champs de bataille (présence sur et dans les sols d'UXOs).

Les données concernant (i) le pourcentage de munitions tirées ayant suivi un régime de déflagration (détonation de bas-ordre), (ii) le taux d'imbrûlés après le dysfonctionnement de ces projectiles, sont éminemment plus complexes à acquérir. Les fréquences de LOD des munitions modernes tirées sur les champs de tir actifs en Amérique du Nord, s'établiraient entre 0,01 et 0,001%. Lors des déflagrations, les *casings* des projectiles sont partiellement déchirés et le chargement expulsé et dispersé autour du point de détonation en une multitude de fragments pluri millimétriques à centimétriques, plus au moins grossiers (respectivement désignés par « *chunk*s » et « *flakes* »).

De l'explosif adhère généralement encore aux parties les plus solides des projectiles (ogives et culots). Ces fragments peuvent subsister dans les sols d'autant plus longtemps que leur taille est élevée, généralement plusieurs dizaines à centaines d'années. La dissolution des fractions solubles de ces fragments conduits à leur émiettement progressif qui concoure à accélérer les cinétiques de dissolution. Selon les hypothèses et valeurs annoncées par les études, la détonation de bas-ordre d'un seul engin tiré libèrerait dans les sols, au point d'impact, une masse résiduelle environ 5 fois plus élevée que celle générée par les détonations de haut-ordre de 1 000 projectiles.

Ces fragments peuvent donc constituer encore aujourd'hui des sources actives et rémanentes de pollution et influencer la qualité des sols et des eaux souterraines par dissolution.

Modalités d'introduction différée des résidus d'explosifs des munitions en absence de détonation

Les *casings* métalliques des UXOs subissent au contact de l'oxygène, de l'eau et des conditions environnementales, une dégradation, puis une désagrégation, désignée par corrosion, se traduisant, à plus au moins long terme, par la perte de tout ou partie de l'intégrité des *casings* et à la mise en contact des chargements avec l'environnement. L'exposition des chargements à l'environnement s'effectue sur des échelles de temps dépendantes des cinétiques de corrosion (variant selon la nature des métaux, de l'état des *casings* et des conditions environnementales) et des épaisseurs des *casings*.

La corrosion est un phénomène complexe, faisant appel à de nombreux mécanismes chimiques, électrochimiques, et combinant une corrosion généralisée et une corrosion ponctuelle (perforante). Aucune recherche publiée ciblant les mécanismes et cinétiques de corrosion des enveloppes des UXOs de la Première Guerre mondiale n'a été identifiée dans le cadre de cette recherche. Les recherches menées sur les munitions modernes montrent que le processus de corrosion suit un processus en au moins trois phases avec des cinétiques très lentes. Les professionnels du déminage sont catégoriques : les engins extraits des sols cent ans après leur tir sont globalement en bon état.

Des cinétiques inférieures à 0,1 $mm.an^{-1}$ et une valeur de 0,025 $mm.an^{-1}$ sont généralement retenues dans les modèles de corrosions des études américaines (SERDP, ERDC (2014))[2101] et allemandes (LfU (2009) Land de Bavière)[2102]. A ce rythme et au regard des épaisseurs des parois des *casings* des munitions de la Grande Guerre, des siècles seraient encore nécessaires avant que leurs chargements soient exposés à l'environnement. L'hétérogénéité des conditions physico-chimiques régnant dans les sols hôtes des UXOs le long des anciennes lignes du front occidental, la diversité (i) des engins, (ii) de leur état après impact, (iii) des épaisseurs de leurs parois, laissent présager une libération différée, incontestablement progressive, difficilement prévisible dans le temps comme dans l'espace, des constituants solubles, mobiles, persistants, et toxiques formant les chargements.

[2101] Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). *Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? op. cit.*

[2102] Schwendner, A. (2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*. *op. cit.*

Destruction de REG par pétardement (*Open Detonation*). Une pratique polluante ?

L'introduction dans les sols puis les eaux souterraines de résidus d'explosifs suivant les modalités de LOD, HOD et de corrosion d'UXO peut s'effectuer ponctuellement sur les sites de destruction de Restes Explosifs de Guerre (REG) par pétardement (OD, *Open Detonation)*. Il s'agit d'une méthode ancienne, radicale, de neutralisation des projectiles explosifs qui se base sur la transmission volontaire d'une détonation (d'une charge initiale « donneuse ») par « sympathie » à une munition ou à un ensemble d'engins et/ou matériels explosibles généralement organisés en tas (dénommés « fourneaux ») selon des designs permettant aux artificiers d'optimiser la détonation. Cette méthode a été très largement mise en œuvre durant la guerre et post-conflit pour neutraliser les REG qui ne pouvaient être démontés et vidés de leurs chargements dans le cadre d'opération de récupération profitables de vieux métaux.

Elle fut aussi appliquée aux engins épars, jugés dangereux et intransportables et détruits sur le lieu de leur découverte (destruction par BIP, *Blown-In-Place)*. Les engins visés par ces démolitions peuvent suivre en une même opération, sous l'impulsion d'une même détonation initiale, tout ou partie des trois régimes (i) détonation de haut-ordre, (ii) détonation de bas-ordre et (iii) absence complète de détonation. Dans le premier cas les munitions sont intégralement lacérées en une multitudes d'éclats et fragments de différentes tailles tandis que le chargement est quasiment intégralement décomposés. Dans le second cas, les *casings* sont fracturés et le chargement partiellement décomposé, l'explosif étant libéré sous forme de particules parfois grossières (*flakes* et *chunks*) et/ou reste solidaire des fragments métalliques pour les parties les plus solides des engins. Enfin, dans le troisième cas les engins restent intègres mais subissent souvent, du fait des fortes contraintes mécaniques lors de l'explosion des fourneaux, des déformations (ovalisation, fissurations, etc.).

Les ondes de choc des détonations répétées à même le sol, en un même point, se traduisent par une compression, une désagrégation du sol et l'expulsion des matériaux pédologiques autour du point de détonation. Les fragments métalliques des *casing*s, ceux des chargements imbrûlés et les engins non détonés se mêlent aux matériaux de sol destructuré.

Des élements de munitions sont littéralement « injectés » dans les sols à la base des fourneaux. Des dépressions circulaires aux bordures surélevées (lèvres), désignées par « entonnoirs », s'ouvrent ainsi. Les dimensions de ces entonnoirs peuvent dépasser plusieurs dizaines de mètres de diamètre pour plus de 5 mètres de profondeur, dépendent de la nature du sol, de la puissance des fourneaux, et du tonnage détruit. Après détonation, une partie des matériaux retombe dans l'entonnoir (*fall-back*), alors que d'autres sont éjectés par-dessus les lèvres à plusieurs dizaines de mètres du point de détonation (zone de retombée (*fall-out*) appelée zone de projection dont la géométrie peut être influencée par les vents dominants. Des engins ou fragments de grandes dimensions peuvent être éjectés encore plus loin, jusqu'à des distances kilométriques, et retomber dans la zone dite de dispersion (*Streugebiet*).

L'entonnoir est généralement abandonné lorsque sa profondeur rend son point le plus bas difficilement accessible pour les artificiers ou encore lorsqu'il est envahi par les eaux. Les démolitions sont alors poursuivies si nécessaire dans un entonnoir exploitable proche voisin. C'est ainsi que les entonnoirs peuvent se succéder en enfilades, en rangées parallèles, isolées ou coelescentes pour former des terrains d'explosion (TE) (ou polygones de destruction) pouvant comporter plusieurs dizaines d'entonnoirs. Les terrains d'explosion furent abandonnés tels quels post-exploitation, se comblant alors partiellement, progressivement et naturellement par des particules fines (colluvionnement) et de la matière organique. D'autres, notamment en environnement agricole, furent remblayés par des matériaux sains apportés ou par ceux, éparpillés et potentiellement pollués, présents dans la zone de projection ou par des déblais et détritus (dépotoirs).

Compte tenu (i) de la coexistence des trois comportements des engins chargeant les fourneaux sous l'effet de la sollicitation d'une même détonation initiale, (ii) de la grande diversité des munitions détruites, les résidus issus des munitions présents dans les entonnoirs et dans la zone de dispersion sont extrêmement hétérogènes en compositions et dimensions.

L'évaluation qualitative et quantitative des masses résiduelles introduites dans les sols et le taux de décomposition des masses des chargements, lors des détonations des fourneaux de destruction formés d'engins de la Grande Guerre n'a pas fait l'objet de recherches et études spécifiques au regard des éléments bibliographiques rassemblés dans le cadre de la présente recherche. Seule une approche analogique avec les résultats acquis (i) sur des munitions modernes tirées sur les champs de tir et terrains d'exercice actifs en Amérique du nord (ERDC (2014)) et (ii) sur des terrains d'explosion de destruction des REG post-Seconde Guerre mondiale en Bavière (LfU (2009)), peut être proposée, dont les limites sont discutées.

Ces études montrent que la valeur de 0,001% (ERDC (2014)) de la charge explosive initiale constitue une valeur haute pour le taux de dispersion des imbrulés après détonation de haut-ordre (HOD). Une valeur similaire, de 0,003%, est retenue par le LfU (2009). La granulométrie de ces particules d'imbrûlés est très fine, de l'ordre ou inférieure à 1 mm. Le taux de 50% a été retenu dans les modèles nord-américains (ERDC (2014)) pour quantifier la masse résiduelle après LOD. Les dimensions des particules retenues dans les modèles de transfert environnementaux nord-américains sont typiquement inférieures à 100 mm. Le LfU (2009) a volontairement écarté l'usage de ces valeurs estimant le pourcentage d'incertitudes trop élevé.

Ces valeurs proposées par l'ERDC (2014) comme par le LfU (2009) ne sont qu'indicatives et aucunement représentatives des masses résiduelles laissées par les pétardements massifs de fourneaux au terme de la Première Guerre mondiale qui sont vraisemblablement nettement plus élevées que celles avancées dans la littérature, comme l'attestent certains documents photographiques ou cinématographies historiques récoltés dans le cadre de cette recherche, mais aussi les observations remontées du terrain. La nature, les dimensions, les quantités et densités de résidus laissés post-détonation, dont dépendent la nature, l'extension, la magnitude et la rémanence des pollutions, des eaux souterraines et/ou des sols, générées par les sites de pétardement, sont vraisemblablement très variables d'un terrain de destruction à l'autre, voire d'un entonnoir à l'autre.

Si les teneurs dans les sols de surface ([0-40 cm] en environnement labouré) en métaux, métalloïdes et autres NAC (sous-produits de transformation environnementale compris), mesurées ponctuellement sur quelques terrains d'explosion en Meuse et dans le Nord dans le cadre de cette recherche, restent faibles à modérées, il est vraisemblable qu'elles ne reflètent en rien celles susceptibles d'être rencontrées à la base des anciens entonnoirs où se concentreraient l'essentiel des fragments issus des munitions. En ce sens, ces zones de pollution concentrée sont avant tout à considérer comme des sources potentielles susceptibles de dégrader la qualité des eaux souterraines. Les fragments de chargement présents dans ces entonnoirs subissent les effets de la dissolution au contact des eaux météoriques infiltrées qui alimentent *per descensum* les nappes tandis que des mécanismes de corrosion désagrègent sur les moyens et longs termes les enveloppes métalliques des engins, causant à terme (des dizaines et centaines d'années) (i) la perte de tout ou partie de leur intégrité et (ii) l'exposition des chargements à l'environnement. Ces corrosions sont facilitées et accélérées sur les engins endommagés.

Les terrains d'explosion au sein desquels de forts tonnages de munitions furent éliminées par OD peuvent avoir concentré des masses importantes de fragments métalliques et de composés entrant dans la constitution des chargements quels que soient les taux de décomposition des chargements à l'issue des détonations. Les entonnoirs susceptibles d'être les plus marqués sont ceux (i) ayant démolis de forts tonnages de munitions explosives de gros calibres, (ii) ayant été remblayés par les matériaux de la zone de projection, et (iii) ceux n'ayant pas fait l'objet de recherches (par piochage) et de récupération dans l'entre-deux-guerres. Les eaux météoriques, en s'infiltrant *per descensum*, convergent préférentiellement vers le point bas des entonnoirs remblayés, là où se concentrent les fragments de chargement, les résidus particulaires et les éventuels engins non détonés.

Les résidus présents dans les auréoles de projection et de dispersion ourlant les entonnoirs contribuent aussi au flux massique en polluant introduits dans les sols et les eaux. Les premiers subissent la dissolution des fractions hydrosolubles tandis que les derniers sont lentement désagrégés par les mécanismes de corrosion qui peut être accélérée par les *casings* endommagés.

Comme pour les engins tirés et les résidus dispersés sur les anciens champs de bataille, avec le temps, la contribution à la libération de flux et masses de composés vers les sols et/ou les eaux souterraines issus des engins de guerre enfouis, non explosés, tirés ou non, en cours de corrosion va irrémédiablement s'accroître contrairement à celle des fragments d'explosifs déjà introduits dans l'environnement consécutivement aux détonations (haut- comme bas-ordre) en cours de vieillissement (pertes de masse par dissolution).

Les terrains de destruction par OD représentent plus de 75% de l'ensemble des (environ 200) sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans l'inventaire national du BRGM[2103]. Cet inventaire est non exhaustif. L'existence de ces sites ne préjuge en rien de leur état de pollution.

Les travaux de recherche publiés concernant la rémanence de résidus après détonation de fourneaux de destructions ou d'engins isolés ((ERDC, 2014). LfU (2009). Tomic (2018)), les résultats d'études originales sur des terrains de destruction mis à disposition pour cette présente recherche ou encore ceux issus d'études de cas réalisés dans le cadre de ce doctorat démontrent sans équivoque que les opérations de destruction de REG par pétardement en masse sont polluantes et constituent un vecteur d'introduction dans les sols environnants de composés métalliques (principalement Fe, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb, Al, etc.) et d'origine pyrotechnique (majoritairement des NAC et des nitramines). Le caractère polluant de ces sites eu égard aux eaux souterraines a aussi été démontré. Le marquage du puits de Cramont dans la Somme, à 45 km au nord-ouest des anciennes lignes de front, par les ions perchlorate de synthèse et un cortège de NAC atypiques (mélange de DNT, DNB, ADNT (ex-TNT)) constitue un cas d'école et une preuve indéniable que les sites de destruction de munitions contribuent au marquage des eaux souterraines par composés d'origine pyrotechnique anciens. Le captage se situe en aval du terrain d'explosion présumé et à ce jour remblayé au sein duquel siègent des pollutions concentrées, générées par les opérations de désobusage industriel, qui alimentent un panache de polluants d'origine pyrotechnique dans les eaux souterraines à l'instar des sources et panaches de pollutions historiques industrielles. Ce panache s'étend selon le sens des écoulements de la nappe de la Craie vers l'ouest-sud-ouest. Ce site de Conteville a été exploité par deux industriels dont F.N. Pickett & Fils (à compter de 1920).

[2103] Hubé, D. (2019). *1914-1918. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales*, *op. cit.*

Enfin, les reconnaissances de terrain réalisées sur des sites de pétardement montrent que les terrains d'explosion datant de l'entre-deux-guerres constituent encore des sites dangereux où la probabilité de découverte d'engins de guerre encore en puissance d'explosion (pollution pyrotechnique) est élevée.

Open Burning. Pollutions spectaculaires, rares et immobiles des terrains de brûlage (_Burning Grounds_) des Restes Explosifs de Guerre

Les recherches historiques dont les résultats ont été présentés dans ce qui précède montrent que l'OD ne fut pas la seule méthode d'éradication et de déchargement des REG. Le brûlage à l'air libre (*Open Burning* (OB) fut aussi pratiqué sur des tonnages importants REG (plusieurs milliers de tonnes) et générèrent des résidus de brûlage (déchets de combustion). Les terrains de brûlage (*Burning Grounds* (BG)) où de tels résidus ont été identifiés, observés et caractérisés, sont ceux (i) du site F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » (Gremilly, département de la Meuse), (ii) du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander (sites de Noire Fontaine et Rampont, canton de Spincourt, département de la Meuse), (iii) de la *C-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Trélon (Parc Jeannette) et Liessies (Bois l'Abbé), département du Nord), (iiii) de la *B-Factory* de F.N. Pickett & Fils (Westroozebeke, Flandre occidentale, Belgique), (iiiii) du Bois Brûlé (Conteville, département de la Somme), (iiiiii) de la *E-Factory* de F.N. Pickett & Fils d'Audruicq (département du Pas-de-Calais) et (iiiiiii) de Zweedorf (Mecklembourg-Poméranie, Allemagne), soit environ 13 BG.

Ces résidus apparaissent comme des matériaux granulaires, hétérogènes, d'un faciès cendreux à scoriacé, parfois d'aspect gras, noir et moiré, ou encore gris à vert olive. Pelliculaires (quelques centimètres d'épaisseur), ces résidus peuvent former une couche de plusieurs dizaines de centimètres de puissance. Les sondages à la pelle mécanique réalisés au droit du site de la « Place à gaz » montrent que la surface de ce BG ne peut être qualifié de sol au sens pédologique du terme, car constitué de matériaux totalement anthropiques, s'assimilant *in fine* à une couche de déchets dangereux générés par des procédés industriels. Les reconnaissances de terrain, montrent aussi que ces résidus pourraient se subdiviser en deux catégories (i) des résidus autochtones, déposés au droit des BG où ils ont été générés et (ii) les dépôts allochtones, lorsqu'ils ont été déplacés et déposés à proximité des BG où ils ont été calcinés. Ces derniers dépôts, généralement très riches en tessons de fioles d'arsine, pourraient aussi possiblement correspondre à des aires de brûlage de finition de fioles partiellement brûlées / vidées issues des BG de munitions à *Croix bleue*.

Les archives documentent de façon précise et générique les méthodes et moyens de destruction des REG par brûlage dans l'entre-deux-guerres, mais sont avares en informations sur la nature et la conduite opérationnelle des brûlages, et en particulier sur la typologie, les quantités d'engins neutralisés, à l'échelle de chaque terrain de brûlage. La caractérisation de (i) la nature, de la localisation et de la position, (ii) l'état physique des éléments anthropiques et/ou d'origine pyrotechniques présents au droit des BG et/ou au sein des résidus de brûlage, ainsi que de (iii) la composition des cortèges d'éléments chimiques et de molécules organiques constituant ces matériaux, permet par interprétation et déduction d'éclairer la connaissance des faits et pratiques de destruction de REG par brûlage. D'importants efforts analytiques furent consentis pour explorer la composition de ces résidus atypiques, considérant dans un premier temps, pour définir les panels analytiques à appliquer, les connaissances historiques sur la composition des matériels et matières de guerre et le comportement environnemental des éléments et substances organiques en question.

Cette recherche met en exergue l'intérêt de la démarche de caractérisation approfondie, chimique et pyrotechnique, des pollutions historiques et des résidus de brûlage comme une source indirecte et originale de connaissances des pratiques historiques sur les sites de brûlage là où les archives font défaut. L'interprétation de ces géoindicateurs et l'expertise pyrotechnique complètent pertinemment les informations délivrées par les sources d'archives classiques.

Ainsi, des teneurs élevées à la fois en arsenic inorganique, en composés organo-arséniés dérivés des diphénylarsines, associés à des tessons en verre vert de fioles d'arsines vomitives témoignent de neutralisations d'obus allemands à *Croix bleue*. La présence concomitante de monochlorobenzène et de thianes témoigne du déchargement d'obus à *Ypérites* au soufre allemandes tandis que le cortège constitué par le brome lixiviable, les composés bromés monoaromatiques et les dioxines et furanes bromées (PBDD & PBDF) est symptomatique de la présence dans les sols de restes d'agents lacrymogènes bromés (comme le *T-Stoff* allemand) et leurs sous-produits dérivés. La destruction de fusées d'artillerie allemandes est attestée par la présence dans les sols et les résidus par de fortes teneurs en zinc bien corrélées au cadmium, au cuivre et en moindre mesure au mercure. Enfin, l'étain est également présent à des teneurs anomaliques, localement très élevées (> 6 $gSn.kg^{-1}$ MS), dont l'occurrence pourrait s'expliquer par le déchargement d'engins de guerre à charge fumigène ($SnCl_4$ ou « Liqueur de Libavius ») ou de munitions à l'intrados étamé (chargées de *Mélinite*).

Les résidus de brûlage sont principalement marqués par les Eléments Traces Métalliques (ETM) avec des teneurs rarement rencontrées sur des sites et sols pollués: arsenic (As) sur les sites de destruction de munitions à arsines, zinc (Zn), cuivre (Cu) et en moindre mesure cadmium (Cd), mercure (Hg) sur les BG dédiés aux fusées d'artillerie, plomb (Pb) et étain (Sn). Elles excèdent le $g.kg^{-1}$ MS voire 100 $g.kg^{-1}$ MS pour As et Zn. Ces teneurs sont liées à la présence dans les résidus de fragments métalliques millimétriques, d'une fraction sorbée sur les éléments constitutifs des résidus et de minéraux arséniés et/ou zingués néoformés. Les métaux et métalloïdes libérés depuis les *casings* des obus et de leur chargement, et des fusées brûlées sur les mêmes sites se recombinèrent en effet sous la forme de phases minérales amorphes ou cristallisées néoformées. L'arsenic des arsines totalement décomposées (en As, H_2O, CO_2, HCl) s'oxyda et s'exprima sous forme d'arséniate (AsO_4^{3-}) de fer (issu des *casings* et/ou du milieu naturel), de Cu, de Zn (issus des fusées) dans les résidus avec des habitus minéralogiques hérités des phases de montée et de descente des températures

Les NAC et leurs sous-produits de transformation environnementale tout comme les sous-produits organo-arséniés n'ont été détectés qu'à l'état de traces (< $mg.kg^{-1}$ MS). D'une manière générale, les NAC détectés dans les résidus de combustion et dans les sols au droit et aux abords des BG possèdent une signature chimique dominée par le TNT, les isomères des DNT, DNB, et leurs sous-produits de transformation environnementale, qui reflètent aussi la nature des chargements explosifs, en particulier ex-allemands.

L'autre particularité des résidus de brûlage est leur teneur systématiquement anomalique (bien supérieure au fond géochimique en environnement rural) en dioxines et furanes chlorées (PCDD & PCDF, PolyChloroDibenzo-p-Dioxines & PolyChloroDibenzoFuranes), localement en dioxines et furanes bromées (PolyBromoDibenzo-p-Dioxines & PolyBromoDibenzoFuranes). Les teneurs se sont révélées localement extrêmes (> 4 000 000 ng kg / MS (∑PCDD + PCDF)). Des composés organo-arséniés « exotiques » d'une grande diversité appartenant aux familles polyphénylées (di- et tri-phényls) et aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques arséniés (As-HAP) ont aussi été mis en évidence dans ces résidus par des recherches originales et parfois quantifiés dans des résidus très marqués par l'arsenic.

Ces molécules n'ont jamais été intentionnellement synthétisées par l'industrie chimique; il s'agit de substances résultant de recombinaisons moléculaires de radicaux réactifs produits à partir de molécules mères hydrocarbonées en présence de chlore et/ou d'arsenic lors de phénomènes de combustion à basse température (combustion incomplète).

Les PCDD &PCDF se forment ainsi majoritairement vers 450°C. Ces substances ont été mesurées à fortes teneurs en particulier dans des résidus renfermant (i) des fioles intactes vidées de leurs arsines contenant des résidus noirs goudronneux, (ii) des fioles déformées et partiellement fondues et (iii) des billes et galettes de verre vert totalement fondues. Il s'agit d'indications que ce verre a été porté au moins à sa température de ramollissement (~ 600°C), voire au-delà, jusqu'à sa température de fusion (> 1 500 °C). La présence dans les sols naturels au contact des résidus de brûlage d'horizons rubéfiés (rouge brique), teintés par les oxydes de fer, constitue une autre indication des fortes températures auxquelles furent portés les sols et les résidus.

Le chargement des obus à *Croix bleue* ayant contenu ces fioles d'arsines fut donc soumis à un processus thermique dans des foyers au sein desquels régnaient de forts contrastes et gradients de température ce que semblent corroborer les rares documents d'archives décrivant les opérations de brûlage de ces engins : les foyers étaient allumés le soir puis laissés actifs, sans surveillance, durant nuit. Le lendemain, les inspections des munitions triaient les engins, séparant ceux totalement calcinés et déchargés, de ceux partiellement vidés et devant être repris par une nouvelle séquence de brûlage. PCDD, PBDD, PCDF, PBDF et PCB *Dioxin-Like* devaient se former durant toutes les étapes des séquences de brûlage, depuis la montée en température jusqu'à l'extinction et au refroidissement, mais leur production devait culminer durant la phase de refroidissement, lorsque les foyers atteignaient une température inférieure à celle de la pyrolyse et de la destruction des dioxines et furanes.

Cette émission aurait été rendue possible par l'excès de chlorures de diphénylarsines (*Clark 1*), dans les brassiers durant toutes la séquence de brûlage. Les *Clark 1* possèdent (i) une structure chimique très proche des PCDD & PCDF (correspondant à des groupements biphénylés oxydés), et (ii) des atomes de chlore. Les arsines constituent ainsi des précurseurs à la formation par pyrolyse imparfaite des dioxines et furanes. Les stabilisants des ergols solides nitrocellulosiques, comme les diphénylamines, possèdent aussi une structure chimique proche des PCDD & PCDF. Enfin, d'autres molécules, plus simples, à moindre poids moléculaire, (comme le monochlorobenzène, les NAC, ou encore les sulfure d'éthyl dichlorées, ou *Ypérite*) ont pu être, en présence de chlore ou de brome, à l'origine de dioxines et furanes halogénées.

On constate sur la presque centaine d'échantillons analysés pour le dosage des PCDD & PCDF, une signature (rapport entre les teneurs en homologues) généralement dominée par les furanes (∑PCDF > ∑PCDD, ∑PCDF / (∑(PCDD + PCDF) > 70%) avec une prévalence des congénères bassement chlorés (TétraChloroDibenzoFuranes, TCDF), avec toutefois, sur certains BG des signatures singulières par des teneurs émergentes en congénères hautement chlorés (OCDF et OCDD), nécessitant pour leur formation un excès d'atomes de chlore. L'hypothèse du brûlage de chargement chimique et fumigène peut être avancée.

Les métaux, métalloïdes, PCDD & PCDF présents à des teneurs exceptionnellement très élevées dans les résidus de brûlage montrent une mobilité environnementale pourtant très faible du fait (i) de la très faible hydrosolubilité des molécules organiques polyaromatiques de haut poids moléculaire et des oxydes métalliques, (ii) du caractère planaire des composés aromatiques (Kd et K_{oc} très élevés) et (iii) de la capacité de sorption très élevée des résidus de brûlage liée à leur composition, riche en oxyhydroxydes de fer, et en éléments charbonneux granulaires finement dispersés. Cette particularité explique les écarts très importants constatés entre les résultats analytiques sur des extraits après lixiviation à l'eau et ceux obtenus après extraction aux solvants organiques. Une mobilité de certains polluants (PCDD, PBDD, PCDF, PBDF, Zn) vers les eaux de surface et leurs sédiments a été constatée dans l'environnement de certains BG, due à des entrainements mécaniques par ruissellement de particules de sols et résidus, sur lesquelles les polluants sont sorbés, à la faveur d'épisodes de forte pluviométrie.

Les pollutions des sites de brûlage peuvent s'avérer être spectaculaires par l'effet phytotoxique prononcé des polluants sur la végétation. En environnement forestier, là où les résidus de brûlage ont été abandonnés tels quels, les teneurs extrêmes en ETM se traduisent par l'absence de couvert végétal au niveau des zones de pollution les plus concentrées ; latéralement, les teneurs diminuant, la végétation colonise ces surfaces par des associations d'espèces tolérantes, résistantes, qui se distribuent concentriquement selon les gradients des teneurs. En environnement agricole, les teneurs en ETM des sols de surface sont moindres du fait de phénomènes de dilution et de dispersion des masses de polluants par le brassage sur [0-40 cm] des résidus avec les sols naturels à la faveur des labours. Ces teneurs sont encore suffisamment élevées pour jouer négativement par leur phytotoxicité, par l'inhibition de la croissance et du développement des plants (orge, maïs, etc.).

Marquage environnemental consécutivement aux opérations d'OB, d'OD. Deux états contrastés

Les sites de destruction de munitions par OB sont d'extension très limitée (quelques centaines de m^2) et peu nombreux comparativement aux sites de démolition par OD (plus de 70% des sites de destruction de REG identifiés, avec des terrains de démolition parfois étendus sur quelques hectares) au regard de l'inventaire historique dressé par le BRGM (2018) et des archives consultées dans le cadre de cette recherche. Les pollutions associées aux opérations d'*Open Burning* sont certes spectaculaires par leur caractère hautement phytotoxiques, mais sont rares, très localisées et peu ou pas mobiles et de fait n'impactent que très peu le milieu aquatique.

Ces zones exposant en surface des teneurs très élevées, voire extrêmes, de polluants toxiques, CMR (Cancérigène, Mutagène, Reprotoxique) et persistants, peuvent constituer des milieux d'exposition directe et/ou indirecte, et nuire au libre usage des sols, agricoles comme forestiers. La découverte fortuite de pollutions sévères des sols agricoles en Meuse en 2015, en lien avec les installations historiques de désobusage industriel Clere & Schwander, enclencha, dans un contexte socio-politique tendu, la réalisation de diagnostics des sols, des eaux et denrées alimentaires, pour en évaluer les risques. Ces spécificités distinguent ces sites pollués par OB des terrains d'explosion OD où les zones de pollution concentrées se situent en profondeur, à la base d'entonnoirs d'éclatement généralement remblayés par des matériaux peu ou pas pollués. Les résidus d'explosifs générés par OD sont plus mobiles que ceux par OB, car plus solubles et moins facilement sorbés sur les fractions minérales et organiques formant les matrices solides des sols.

Ainsi, les rares sites de destruction par OB montrent des sols de surface extrêmement pollués qui constituent des milieux d'exposition à des polluants aisément accessibles n'affectant pas les eaux souterraines tandis que les nombreux sites de destruction par OD impactent préférentiellement les eaux souterraines en exposant en surface que des pollutions faibles à modérées (comparativement aux fonds géochimiques).

Des zones de pollution concentrée rémanentes héritées de la Grande Guerre industrielle et de sa sortie industrielle

Les recherches historiques ainsi que les résultats des études sectorielles exposés dans ce manuscrit mettent en exergue deux situations susceptibles d'être à l'origine de zones de pollution concentrées et d'une dégradation durable et étendue des eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechniques

La première est celle des zones de guerre de mines, qui sont doublement complexes, car s'y combinent un environnement hydrogéologique anthropisé fracturé de géométrie inconnue, contrôlant le cheminement des eaux souterraines et d'infiltration, et un long historique dans lequel se mêlent des combats souterrains par la mine (à grands apports d'explosifs, parfois se chiffrant à plusieurs centaines de tonnes) et des combats violents en surface pour la prise des hauteurs, usant notamment de moyens d'artillerie de tranchées ((per)chloratés).

Des destructions en masse de REG furent parfois opérées dans ou à proximité immédiate des entonnoirs de mine durant la sortie de guerre. De telles opérations sont avérées (Courtes Chausses en Argonne, Cote 108 à Berry-au-Bac, etc.) ou peuvent être pressenties sans qu'il soit possible de l'affirmer au regard des données disponibles (Allencombe à La Chapelotte). Les détonations répétées sous terre comme en surface, totales ou partielles, contribuèrent à introduire sur ces secteurs géographiques très localisés, des résidus d'explosifs dans les sols et les couloirs de fracturation du massif rocheux, précisément là où s'effectuent les circulations préférentielles des eaux souterraines (Argonne, Vauquois) et l'infiltration des eaux météoriques ou de petites nappes perchées (La Chapelotte). Des charges dysfonctionnelles abandonnées ainsi que des explosifs en vrac et autres matériels explosibles délaissés dans les systèmes de galeries profondes qui s'ennoyèrent peuvent aussi contribuer à marquer durablement les eaux souterraines par des composés d'origine pyrotechnique. Cet environnement hydrogéologique localement fortement anthropisé ainsi que la présence de masses considérables d'explosifs directement exposées aux conditions environnementales forment un terreau très favorable à la genèse de pollutions des eaux souterraines durables et concentrées. (i) Les ions chlorate (de la *Cheddite*), la nitroglycérine (de la *Dynamite-Gomme*) ainsi que les ions perchlorate (avec un signature isotopique Atacama) (de la poudre noire) peuvent provenir de fourneaux français, (ii) l'aluminium, les ions nitrate et ammonium (de l'*Ammonal*) de fourneaux britanniques. L'empreinte des explosifs allemands constituant les fourneaux de mine est caractérisée par le TNT (et les isomères des ADNT qui en découlent), les isomères du DNT, les impuretés des DNT et TNT (des explosifs de sureté et des *Perdites*) ainsi que par les ions perchlorate (avec une signature isotopique synthétique) (des *Perdites*).

La seconde situation est celle des centres de destructions des Restes Explosifs de Guerre et des surplus de l'Artillerie. En effet durant la guerre et surtout dès novembre 1918, des consignes furent passées afin de faire procéder à la récupération des matières et matériels explosibles des munitions éparses, tirées (UXO) ou non utilisées, qu'elles soient françaises, alliées ou encore allemandes, abandonnés au droit et aux abords des anciens champs de bataille. Les matières explosibles initialement dispersées se retrouvèrent ainsi concentrées sur une aire géographique restreinte. Ces mécanismes de rassemblement et d'accumulation de masses, initialement dispersées sur de vastes secteurs géographiques, sur des zones d'extension très restreinte, génèrent des situations où sont rassemblées les conditions pouvant déboucher sur la formation de zones de pollution concentrée, si ces masses sont déconfinées, extraites de leurs contenants, et introduites dans les sols. Dans le cas des REG, ceci s'opère lors des destructions des engins par *Open Detonation* (OD) en masse. Les ions chlorate, perchlorate et les NAC identifiés dans les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France ne constituent pas les polluants caractéristiques des résidus des terrains de destruction par brûlage qui par ailleurs ne sont pas mobiles et n'impactent pas ou peu le milieu aquatique. L'impact d'autres techniques de déchargement des munitions (comme le *wash-out*), pratiquées sur quelques sites d'échelle industrielle, est inconnu.

Le report des localisations des sites de destruction de munitions de l'entre-deux-guerres identifiés dans le cadre de l'inventaire national du BRGM (parmi lesquels une grande majorité de sites de destruction par OD) dans les grandes régions Hauts-de-France et Grand'Est sur la carte de distribution des concentrations en ions perchlorate dans les EDCH (2011-2015) montre que l'empreinte perchloratée des eaux est bien mieux géographiquement corrélée à la répartition des sites de destruction de REG qu'aux anciennes lignes du front occidental. Les sites de destruction et les EDCH marquées par les ions perchlorate sont majoritairement localisés à l'est de ces lignes dans ce qui était les zones des étapes et des armées d'occupation allemande, là où étaient situés les dépôts allemands que les troupes du *Reich* abandonnèrent en 1918 lors de leur retraite.

Or, (i) les munitions ex-allemandes furent rassemblées puis systématiquement détruites dans l'entre-deux-guerres, ce qui signifie qu'un grand nombre (inconnu) de terrains de destruction démolirent des matériels et matières explosibles de confection allemande, (ii) les cortèges de NAC caractérisés dans les eaux à la faveur de cette recherche sont dominés par des composés entrant dans les formulation d'explosifs typiquement allemands (DNT, DNB, TNN).

Dans les secteurs non concernés par la guerre de mines (comme au Lingekopf) et les destructions massives de REG, des composés d'origine pyrotechniques, de nature et en quantités susceptibles de dégrader durablement la qualité des eaux souterraines, ont pu être introduits dans les sols à la faveur de tirs d'Artillerie, en particulier dans les secteurs intensément pilonnés. Le nombre de projectiles déflagrés (détonation de bas-ordre) ou restés inertes (UXO) introduits dans les sols consécutivement à des tirs est directement proportionnel aux quantités tirées et serait de l'ordre de 25% des engins vectorisés. Cette recherche montre que ces projectiles dysfonctionnels peuvent être des pourvoyeurs de composés d'origine pyrotechniques dans les sols en exposant instantanément (après déflagration) ou de façon différée (après une phase de corrosion des *casings* pouvant exiger des centaines d'années) tout ou partie de leur chargement à l'environnement. (i) Les engins épars et isolés détruits par pétardement, (ii) les projectiles tirés et déflagrés et (iii) les projectiles tirés et non explosés en cours de corrosion avancée sont possiblement à l'origine d'un marquage diffus des eaux souterraines par les ions perchlorate et les autres composés d'origine pyrotechnique à des concentrations moindres que celles constatées dans les secteurs de guerre de mines et de destructions massives des REG.

L'empreinte perchloratée et pyrotechnique des eaux souterraines dans le quart nord-est de la France apparaît donc majoritairement allemande et liée aux pratiques guerrières et à la démilitarisation des sols dans la sortie de guerre. Elle est une résultante de (i) l'usage et/ou de l'abandon durant la Première Guerre mondiale par les armées en campagne de quantités considérables (par centaines de milliers de tonnes) de matériels et de matières explosibles, en particulier dans les secteurs de guerre de mines fortement disputés, mais aussi (ii) des destructions à des échelles industrielles de quantités considérables de Restes Explosifs de Guerre et surplus d'engins obsolètes, en particulier ex-allemands dans l'entre-deux-guerres. Des sites hybrides où des terrains de guerre de mines furent réinvestis post-conflit par des chantiers de destruction de Restes Explosifs de Guerre, ont aussi été identifiés. Ces ions perchlorate, très mobiles et persistants dans les eaux, peuvent être issus de la dissolution de résidus d'explosifs d'une grande diversité introduits dans les sols et/ou le milieu souterrain, mais aussi provenir en partie (dans des proportions impossibles à estimer dans l'état actuel des connaissances) de terrains où ils purent s'emmagasiner consécutivement à l'usage de nitrates du Chili naturellement perchloratés notamment importés comme engrais pour la culture intensive de la betterave sucrière dans le nord de la France.

La Grande Guerre : source pollution des sols et/ou des eaux ?

La Grande Guerre a marqué durablement les eaux souterraines dans le quart nord-est de la France et possiblement au-delà des lignes de front, c'est certain, mais (i) l'extension de cette empreinte environnementale dont la présente recherche ne fait qu'ébaucher son *Fingerprint* puis (ii) l'apport des éléments d'une meilleure compréhension concernant son devenir dans le temps, restent incertains compte tenu du nombre restreints et de la nature même (forages et sources EDCH, sources non captées, etc.) des points échantillonnés qui ne donnent qu'une vision partielle de la distribution spatiale et de la dynamique temporelle de l'empreinte historique de la Grande Guerre sur les eaux souterraines. Cette recherche constitue toutefois une première démonstration, établie sur des méthodes et moyens scientifiques originaux combinés à des recherches historiques approfondies, du lien entre un conflit majeur interétatique de haute intensité et une dégradation durable de la qualité des eaux souterraines.

Cette recherche montre aussi l'absence de dégradation généralisée de la qualité des sols de surface à l'échelle des anciens champs de bataille de la Grande Guerre par des éléments métalliques initialement présents dans les engins de guerre tirés (principalement As, Cu, Cd, Hg, Pb, Zn). Localement, de légers dépassements du fond géochimique local ont été mesurés et publiés, lorsque des échantillons de sols incorporèrent des éléments métalliques discrets et disperés dans les sols à la faveur des détonations (effet pépite, « *cluster effect* »). Les quantités de métaux formant plus des 4/5e en masse des engins tirés, ne se décomposant pas au moment des détonations, contrairement au chargement organique, seraient sans aucune commune mesure avec les quantités de résidus d'explosifs imbrûlés introduits dans les sols. Les masses seraient pour le 75 mm de l'ordre de 7 * 1 000 kg en métaux, soit 7 tonnes pour un bombardement de 1 000 engins. Plus les tirs étaient concentrés, plus la densité des impacts était élevée, plus la masse de résidus d'explosifs et de métaux par unité de surface et de volume s'éleva, plus les teneurs moyennes sont actuellement importantes. Cette connaissance de la densité des tirs à l'échelle locale (et non à celle souvent publiée des champs de bataille) est essentielle, mais non documentée. Aucune recherche portant sur le marquage chimique de ces sols physiquement anthropisés des champs de bataille par les autres constituants organiques ou inorganiques persistants des munitions n'a été identifiée à ce stade des recherches. Les pollutions des sols les plus sévères, extrêmes et spectaculaires, liées sans équivoque aux REG, sont très localisées sur de rares sites majoritairement à l'écart des anciens champs de bataille. Elles ne furent pas générées par des faits de guerre mais par ceux d'après-guerre, par des opérations de liquidation de tonnages considérables de REG et autres surplus de guerre, hérités de la guerre, dans l'entre-deux-guerres.

La Première Guerre mondiale fut un évènement violent, une guerre totale qui brutalisa pour la première fois l'environnement. Quatre ans seulement suffirent à transformer les paysages de France et de Belgique, déstructurer en profondeur les sols, voir, en profondeur, des massifs rocheux entiers par des explosions aux magnitudes géologiques, en détruisant et modifiant des équilibres hydrogéologiques puis ceux des fonctions écosystémiques des sols (au sens pédologique), comme protéger les eaux souterraines des agents pathogènes depuis la surface. Ces pollutions pathogènes, éphémères, du temps de guerre, affectèrent les combattants, puis s'effacèrent lorsque les détonations cessèrent et laissèrent place à celles, chimiques, persistantes sur de longues périodes de temps, et plus sournoises, aux effets à « bas bruits » générées *post-bellum* mais enracinées dans la guerre.

La Grande Guerre industrielle déboucha sur un après-guerre industriel plus polluant encore que la guerre. Le nettoyage en quelques années des anciens champs de bataille et les opérations de remise en état des sols se traduisirent par une dégradation durable et locale des sols (sites de destruction de REG) mais qui impacta à des échelles plus étendues, régionales, la qualité des eaux souterraines par les composés les plus mobiles et les plus persistants présents dans les résidus d'explosifs. Ces opérations historiques transformèrent clairement une pollution pyrotechnique visible, qui exposait les populations à des risques immédiats et dont il fallait se débarraser le plus rapidement possible dans un contexte d'après guerre à sécuriser, en une pollution environnementale actuelle aux effets sournois. La dimension environnementale et la dégradation des eaux souterraines qui nous préoccupent aujourd'hui étaient certainement inconnues et hors champ des préoccupaution des acteurs du désobusage de l'entre-deux-guerres.

Les cinétiques de corrosion des UXOs présents dans les sols bouleversés par les bombardements de la Première Guerre mondiale, tout comme ceux concentrés dans des entonnoirs de destruction par *Open Detonation* exploités post-conflit, ainsi que les cinétiques de dissolution des résidus de matières énergétiques (poudres et explosifs) introduits dans les sols, bien que rarement quantifiées, sont très lentes. Les polluants présents avec des teneurs extrêmes dans les résidus de brûlage (*Open Burning*) de Restes Explosifs de Guerre et les sols pollués à leur contact sont tous persistants. Cette empreinte de la guerre et de la sortie de guerre perdure 100 ans après leur conclusion et persisteront encore sur des échelles de temps sans aucune commune mesure avec celles des évènements qui l'ont généré.

Ouverture du champ de la recherche. Perspectives

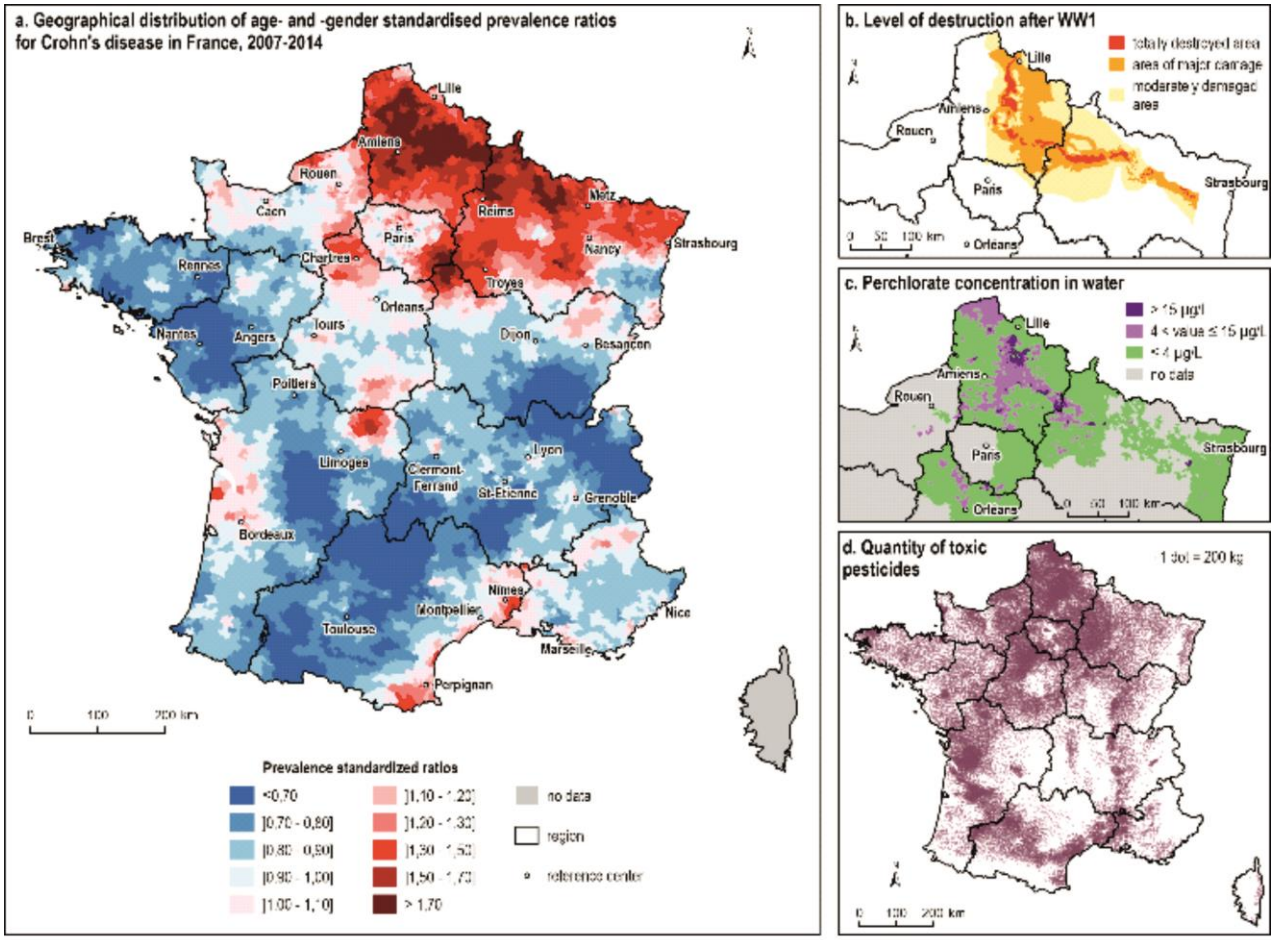
Cette recherche constitue certainement une première tentative d'identifier, de caractériser et de comprendre la séquelle environnementale actuelle, plus de 100 ans après les faits qui l'a généré, de la Première Guerre mondiale et de la sortie de guerre. Si elle répond à certaines questions posées, comme l'origine des ions perchlorate et la véracité de leurs origines militaires anciennes, elle soulève aussi bien des interrogations et ouvre un champ et des perspectives de recherches qui pour répondre à ces questions devront trouver des dimenions interdisciplinaires, par le croisement des champs environnementaux et historiques.

Cette recherche ne donne qu'une vision ponctuelle du marquage des eaux et des sols par les composés d'origine pyrotechnique, mais a montré aussi l'intérêt de s'y pencher, notamment en l'alimentant par des études sectorielles couplant environnement et histoire pour comprendre les phénomènes et les mécanismes en jeu dans la mobilisation de polluants issus de résidus d'explosifs. Il est à regretter que la recherche systématique des ions perchlorate dans les EDCH par les instances sanitaires n'ait pas été associée à celle des ions chlorate (dans les eaux brutes pour ne pas introduire de biais dans les résultats des analyses par les ions chlorate issus de la javellisation), compte tenu de l'intérêt de ces derniers pour tracer l'origine des résidus d'explosifs dégradant les eaux souterraines. L'étude de l'Argonne mériterait d'être approfondie en augmentant la densité des points de mesures, en évaluant aussi les éventuelles variations saisonnières des concentrations au regard des conditions hydrogéologiques locales. Il en est de même plus largement dans le grand quart nord-est de la France où l'occurrence dans les eaux de boisson d'ions perchlorate et plus localement de NAC a été démontrée.

Aucune étude épidémiologique n'est venue explorer ce lien complexe entre santé et environnement et précisément celui entre l'occurrence dans l'environnement, ses usages, de substances chimiques, comme les ions perchlorate et les NAC, ayant été introduits par l'histoire complexe de notre territoire et la survenue d'effets sanitaires nefastes. Le quart nord-est de la France est marqué par une surincidence des Maladies Inflammatoire Chronique de l'Intestin (MICI) (dont la maladie de Crohn) qui a été finement cartographiée aux adresses des personnes diagnostiquées (cf. Figure 444). Il s'agit de maladies strictement environnementales induites par des expositions à des substances chimiques. Il n'existe aucune corrélation de cette surincidence avec la distribution dans les eaux de boisson des pesticides mais coïncide avec les territoires qui furent concernés par les combats de 1914-1918 et dont les eaux sont marquées par les composés d'origine pyrotechnique. Le lien de causalité entre ces effets sur la santé humaine et la qualité des eaux de boisson consommée peut être posée. L'exposition de ces consommateurs aux ions perchlorate et autres substances d'origine pyrotechnique peut être directe, par la consommation des eaux de boisson marquées mais aussi potentiellement indirecte par celle de denrées alimentaires d'origine animale (viande, lait, œufs, etc.) ou végétale (légumes, céréales, etc.) exposées aux eaux polluées. Une recherche sur les éventuels mécanismes de transfert des ions perchlorate et autres composés d'origine pyrotechnique présents dans les eaux agricoles (destinées à l'aspersion, l'irrigation, l'abreuvage) vers le biote, mériterait d'être conduite pour évaluer l'impact de ces composés sur la qualité de ces denrées alimentaires. Les eaux souterraines perchloratées sont intensément exploitées par pompage dans les zones d'agriculture intensives comme les plaines agro-industrielles de Champagne et de Picardie, pour l'arrosage des cultures de maïs, de betterave sucrière, etc. Cet arrosage s'opère pendant les périodes chaudes de l'année, précisément au moment où l'évapotranspiration est à son maximum et les précipitations (susceptibles de lessiver les ions perchlorate des sols de surface) à leur minimum. Les ions perchlorate suivant le cheminement de l'eau sont possiblement concentrés dans les parties respirantes des plantes (feuilles) et peuvent aussi potentiellement s'accumuler dans les sols (l'eau s'évaporant contrairement aux composés non volatils qu'elle renferme). Des travaux de recherche menés aux USA montrent que les ions perchlorate peuvent s'accumuler dans les parties comestibles de plantes et ainsi exposer les consommateurs. Au début des années 2000, ces ions ont été détectés dans des laitues cultivées en Caroline du sud, avec des teneurs comprises entre

0,03 et 0,121 mgClO_4-/kg de plante fraiche (Sharp and Lunder, 2003[2104]). Ces ions ont aussi été détectés dans des denrées alimentaires en Europe. L'EFSA (European Food Safety Authority) (EFSA, 2014) précise que l'usage d'eau d'irrigation marquée par les ions perchlorate peut aboutir à leur accumulation substantielle dans les végétaux feuille[2105].

L'EFSA lance à présent une consultation publique sur son projet d'avis scientifique concernant les risques pour la santé publique associés à la présence de perchlorate dans les aliments. Ce travail répond à une demande de la Commission européenne de réévaluer les risques, en tenant compte des nouvelles données et d'une méthodologie actualisée qui sont devenues disponibles depuis l'évaluation de l'EFSA en 2014[2106]. Le sujet reste d'actualité avec des questions scientifques en suspens.



Emilie Gallet-Moron, Guillaume Decocq / Genin M, Fumery M, Occelli F, Savoye G, Pariente B, Dauchet L, Giovannelli J, Vignal C, Body-Malapel M, Sarter H, Gower-Rousseau C, Ficheur G (2019). Fine-scale geographical distribution and ecological risk factors for Crohn's disease in France (2007-2014). Alimentary Pharmacology & Therapeutics.

Figure 444 : Cartographie de la surincidence des maladies inflammatoires chronique de l'intestin[2107].

[2104] Sharp, R., & Lunder, S. (2003). *Suspect Salads: Toxic Rocket Fuel Found in Samples of Winter Lettuce. Environmental Working Group.*

[2105] European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy. EFSA Journal 2014;12(10):3869. *Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence ofperchlorate in food, in particular fruits and vegetables.* EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM)

[2106] https://www.efsa.europa.eu/fr/news/perchlorate-food-draft-scientific-opinion-public-consultation

[2107] Genin, M., Fumery, M., Occelli, F., Savoye, G., Pariente, B., Dauchet, L.,& Ficheur, G. (2020). *Fine-scale geographical distribution and ecological risk factors for Crohn's disease in France (2007-2014). Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 51(1), 139-148.

Au-delà de ces considérations centrées sur le contexte historique et environnemental français, se pose celles des projections du résultat de cette recherche sur d'autres théâtres des opérations de la Grande Guerre, où rien n'a été publié ou entrepris sur le sujet des legs de la Grande Guerre dans nos eaux souterraines, que ce soit en Belgique ou encore sur le front alpin italien. Les méthodes, moyens et les résultats capitalisés à la faveur de la présente recherche pourraient être exploités à bon escient dans des secteurs géographiques extra-métropolitains marqués par une histoire militaire similaire à celle du quart nord-est de la France.

Une amélioration significative de l'état des connaissances sur le devenir des résidus d'explosif dans l'environnement adviendrait aussi par la réalisation d'expériences et des simulations visant à acquérir (i) les cinétiques de dissolution d'explosifs anciens, notamment (per)chlorates, et (ii) les cinétiques de corrosion des *casings* des UXO. Il s'agit de données incontournables pour apprécier la rémanence du marquage environnemental par ces composés, de sa dynamique temporelle qui va également dépendre des masses introduites dans les sols et de leur distribution spatiale. Des études diagnostic pilote sur des secteurs aux historiques bien connus sur le front seraient pertinentes.

Enfin, il conviendrait de poursuivre (en relation avec les services compétents de la Sécurité civile (déminage) les analyses chimiques et isotopiques sur les explosifs anciens et les eaux souterraines afin d'affiner le référentiel interprétatif propre au contexte historique et environnemental spécifique et singulier du territoire métropolitain et d'explorer la possible diversité des signatures isotopiques des ions perchlorate et nitrate. La question se pose en effet s'il existe au non des entrants nitratés en lien avec les munitions anciennes à l'instar de ce qui a été démontré avec les ions perchlorate.

Une histoire environnementale cyclique

« L'Europe était en paix comme la Terre était ronde et tournait autour du soleil [2108]»

Le retour de la guerre. Chappatte (Suisse)[2109]

[2108] Bauer, A. (2023). *Au commencement était la guerre*. Fayard. Choses vues

[2109] Extrait de *Fichez-nous la paix !* 120 dessins de presse. Gallimard.

Le 24 février 2022 fit irruption dans le présent et en Europe une guerre de « haute intensité », que nous autres, en déprise guerrière depuis la fin de la Guerre d'Algérie, pensions reléguée au passé. L'extériorité du phénomène guerrier soudain se rétrécissait avec la proximité d'une « *forme d'une guerre conventionnelle interétatique comme on n'imaginait plus en voir dans une période dominée par les guerres civiles et les interventions occidentales dans des conflits asymétriques*[2110] ». Les Historiens de la Première Guerre mondiale sont frappés par tant de similitudes entre la guerre d'Ukraine et la Grande Guerre sur le font occidental. Bien que les contextes géopolitiques et géographiques soient différents entre ces deux crises séparées par plus de cent ans, des rapprochements saisissants surgissent, que ce soit dans la symbolique voire la mystique de l'élan guerrier et des buts de guerre, dans les consensus des classes politiques face au choc de la guerre, dans le déroulés et la physionomie de la guerre, dans les tactiques et l'art opératif. Mais les rapprochements entre les deux conflits ne s'arrêtent pas. Les champs de bataille de la Grande Guerre étaient tenus par la puissance de feu de l'Artillerie. Cette arme occupe aussi en Ukraine, chez les deux belligérants, une place centrale dans les tactiques et l'art opératif issus d'un même creuset, celui de la doctrine militaire de l'union soviétique, misant sur la saturation des positions adverses par la puissance de feu et les frappes en profondeur. Dans le Donbass, 2 000 pièces d'artillerie auraient été en activité au printemps 2022, vectorisant sur les positions ukrainiennes environ 12 000 à 15 000 projectiles par jour avec possiblement des pointes à 60 000, auxquels répondirent entre 3 000 et 6 000 obus et roquettes par jour[2111]. A l'est de l'Ukraine, de Kharkiv à Kherson un front continu de 900 km se stabilisa à l'automne 2022, par le rééquilibrage des forces opposées, à l'instar du front occidental de la Grande Guerre (étendu sur 750 km depuis la mer du Nord à la frontière franco-suisse). Le « rendement » des munitions s'est significativement amélioré depuis les débuts de l'artillerie moderne : le taux de « ratés » durant la Grande Guerre s'élevait à environ 25 à 30%, à environ 15% pour projectiles tirés et les bombes larguées durant la Seconde Guerre mondiale en Europe, 5 à 10 % pour des projectiles modernes[2112]. Le taux se serait dégradé sur le théâtre des opérations ukrainien. De récentes recherches avancent des taux entre 10 et 30%, qui sont comparables avec ceux connus des artilleurs durant la Première Guerre mondiale[2113]. Ils seraient liés à l'obsolescence des matériels utilisés, hérités de l'ancienne union soviétique. Les sols ukrainiens, parmi les plus fertiles au monde (dont les terres noires « *Tchernoziom* »), furent et sont encore, à l'instar des sols des plaines agricoles de la Champagne et de la Picardie en 1914-1918, bouleversés et pollués par les REG.L'Ukraine est aussi confrontée depuis son indépendance en 1991 à la problématique des surplus militaire. Fin 2004, selon les données officielles du Ministère de la Défense ukrainien, le stock de munitions s'élèverait à environ 2,5 millions de tonnes parmi lesquels 1,5 millions de tonnes nécessitant une mise au rebus et des démolitions (soit 60% du stock). L'urgence concernait 340 000 tonnes, en grande partie constituées de projectiles entreposés depuis la Première Guerre mondiale et 24 000 tonnes de roquettes et missiles en tout genre[2114]. En 2005 déjà, en moyenne, la capacité de stockage dans les dépôts ukrainiens était dépassée de 20 à 40%[2115].

[2110] Bardiès, L. (2023). *« Retour de la guerre » dans l'imaginaire européen et sciences sociales. Défense & Sécurité Internationale* – n°166 – Juillet – Août 2023. p. 58.

[2111] *Vershinn, A. (2022). The return of Industrial Warfare. RUSI, 17 juin 2022 ; Ponomarenko, I. (2022) Why Ukraine struggles to combat Russia's artillery superiority. The Kyiv Independant, 12 août 2022, dans Fontanellaz, A. (2022) Duels d'artillerie en Ukraine. Défense & Sécurité Internationale – n°162 – Novembre – Décembre 2022. p. 78.*

[2112] *Taylor, S., Lever, J., Walsh, M., Walsh, M.M., Bostick, B., and Packer, B. (2004). Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil Compared to Low- and High-Order Detonations? Op. cit.*

[2113] *Carroll, C. (2023). Unexploded Ordnance Is Scattered Across Ukraine's Front Lines. UMD Researchers Are Mapping Hot Spots With AI. Shells, Rockets Fired in Wake of Russia's Invasion Could Kill for Decades if Left in Place.*

[2114] *« Private Companies will Act as Contractors of the State Corporation for Ammunition Disposal". Defense Express, July 30, 2004.*

[2115] *Kovalchuk, O. (2004). "The Country on a Powder Keg". Argumenty i Fakty v Ukraine, n°20.*

Les enjeux attachés à cette « *ammo threat* », aux quantités considérables de matériel en excès, obsolète et hors service, mais restées en puissance d'explosion, sont dans l'immédiat de deux ordres. Ils sont d'abord sécuritaires, les risques d'explosions catastrophiques s'accroissant avec le temps pour ces dépôts difficiles à garder dans un contexte de mobilisation des forces combattantes au front avec en corollaire la mise en danger des populations riveraines. Puis se pose aussi la question de la sureté et des possibles détournements illicites de ces armes vers des filières souterraines, terroristes et des trafics d'armes malveillants[2116].

En 2014, la Russie envahit les provinces séparatistes du Donbass et de la Crimée, lors de la première guerre du Donbass, au terme de laquelle l'Ukraine devint devant la Syrie, le pays le plus miné au monde.

Selon le Ministère des Affaires Etrangères ukrainien, 174 000 km^2 ont d'ores et déjà été pollués par les mines et autres REG depuis le début de la guerre[2117]. Un programme international de liquidation des munitions anciennes, obsolètes et hors service fut construit et mis en œuvre en Ukraine sous l'égide de l'OTAN. Des engins furent déchargés par brûlage générant des résidus d'aspects similaires à ceux des terrains de brûlage de 1914-1918 en France, en Belgique ou encore en Allemagne (cf. Figure 445).

Figure 445 : Ligne de brûlage de munitions anciennes en Ukraine en 2019[2118]

[2116] *Hubé, D. (2023). Restes explosifs de guerre et brutalisation environnementale en Ukraine : une comparaison avec la Grande Guerre*https://www.politika.io/fr/Article/restes-explosifs-guerre-brutalisation-environnementale-ukraine-comparaison-grande-guerre.

[2117] Bellais, R. (2023). *Mines antipersonnel et autres engins explosifs improvisés. Un coût exorbitant. Défense & Sécurité Internationale* – n°166- Mai – Juin 2023.

[2118] https://www.upi.com/Defense-News/2020/08/19/NATO-resumes-disposal-of-obsolete-ammunition-in-Ukraine/1591597851658/

« La guerre ne se termine pas le jour du dernier tir[2119] »

Nous identifions, mesurons et caractérisons tout juste aujourd'hui en France, plus de cent ans après la cessation des hostilités, dans les sols et les eaux du quart nord-est de la France, parce que nous avons appris à le faire, la partie invisible, immergée de l'iceberg de la séquelle environnementale léguée par la Grande Guerre sur le front occidental alors que l'Europe est ébranlée depuis le 24 février 2022 par un conflit interétatique d'une brutalité inédite depuis la Seconde Guerre mondiale, une guerre d'agression de la Russie à l'encontre d'un état souverain, l'Ukraine.

Cette recherche éclaire ce qu'une guerre de haute intensité âgée de plus de cent ans est capable d'infliger à l'environnement et de léguer au présent mais ouvre des perspectives d'accroissement de nos connaissances sur les séquelles environnementales sur le long terme de ces évènements intermittents très brefs et violents que sont les guerres modernes ouvertes et interétatiques. Protéger l'environnement en temps de guerre est illusoire « *War is a rough and violent game. Destruction is according to its nature and must be so. Each of the belligerents find itself in need when facing the foe. And when in need any means are permitted "Use whatever can be used" is the first law based on the nature of war*[2120] ».

Cette recherche montre que caractériser les multiples facettes de l'atteinte à l'environnement liées aux faits de guerre est possible pour ensuite adapter la gestion de la ressource en eau, les usages des sols et l'aménagement du territoire en connaissance de cause. Le déminage, le désobusage, le débombage, menés afin de rendre possible la reconstruction et la remise en état des sols, constituent un défi colossal auquel est déjà confronté le pays, avec des enjeux sécuritaires et économiques qui débordent très largement les frontières ukrainiennes. Si l'étendue de la pollution pyrotechnique des sols d'Ukraine venait à être divisée de moitié, réduite à environ 80 000 km^2, le nettoyage de ces territoires nécessiterait 50 ans, si, et seulement si, l'équivalent de toutes les ressources actuellement assignées au déminage étaient dirigées vers l'Ukraine[2121].

La liquidation des REG généra dans l'entre-deux-guerres en France comme en Allemagne des pollutions sévères des sols et des eaux. Ces opérations furent menées avec aucune considération environnementale, l'état des connaissances sur le devenir et les effets des substances incriminées étaient balbutiantes ou inexistence. Elles furent menées tambour battant et contraintes par le temps. La connaissance des processus polluants en jeu lors des destructions de REG peut contribuer à améliorer ces pratiques pour ne pas commuer la pollution pyrotechnique aux effets instantanés en pollution chimique au effet sournois sur de longues périodes de temps. Il s'agit à présent d'exploiter ce retour d'expérience et les enseignements méthodologiques, métrologiques capitalisés dans le cadre de cette recherche à des problématiques actuelles, et en particulier Ukrainiennes. A cet effet la recherche mériterait aussi d'être conduite sur la thématique du transfert sol / plante, phénomène démontré pour le TNT et le RDX, en Allemagne, deux explosifs encore largement utilisés dans les arsenaux par les Artilleries actuelles, compte tenu des enjeux des terres agricoles bombardés en Ukraine. Fort des enseignements environnementaux tirés sur et aux abords des anciens champs de bataille de 1914-1918, des pourparlers sont actuellement en cours pour porter assistance à l'Ukraine par une coopération internationale pour la remise en état au plus vite des sols agricoles. D'autres discussions visent à étoffer les chefs d'accusation au Tribunal Pénal International (TPI) à l'encontre de V. Poutine par la qualification de la dimension environnementale du crime de guerre. Le terme d'Ecocide a été prononcé.

[2119] Lohs, K.H. (1991). *Der Krieg endet nicht am Tag des letzten Schusses, Spectrum 22*, H. 2, 24 -26.

[2120] Gilchrist, H.L. (1928), cité dans MacLeod, R. *The Genie and the Bottle : Reflections on the Fate of Geneva Protocol in the United States, 1918 -1928.*

[2121] Steve Brown. *Kyiv Post*. 18 mars 2023. *Landmines and Explosive Remnants of War in Ukraine Will Take Decades to Clear*.

[2121] *Ibid.*

Références bibliographiques et sources

Documentation imprimée

Ouvrages généraux

Audoin-Rouzeau, S. Jean-Jacques Becker, J. J. (sous la direction de) (2004). *Encyclopédie de la Grande Guerre. 1914 – 1918*. Bayard. (i) Colonel F. Guelton, « *Les armées », (ii) Duménil, A., « 1918 : les ruptures de l'équilibre ». (iii)* Audoin-Rouzeau, S., *Avions et chars. (iiii) « Audoin-Rouzeau, S., Combattre. Les batailles de la Grande Guerre » (iiiii)* Audoin-Rouzeau, S., « *Artillerie et mitrailleuses ».*

Audoin-Rouzeau, S., A. Becker., A, (2014), *14-18, Retrouver la guerre*. Editions Gallimard

Audoin-Rouzeau, S., (2008), *Combattre. Une anthropologie Historique de la guerre moderne (XIXe-XXIe siècle).* Les livres du nouveau monde. Editions du Seuil, mars 2008.

Becker, J.J., Krumeich, G. (2012), *La Grande Guerre. Une histoire franco-allemand*e. Texto. Editions Tallandier.

Cochet, F. (2018), *La Grande Guerre : fin d'un monde, début d'un siècle. 1914-1918*. Collection tempus. Perrin.

De Gaulle, C. (1944), *Le Fil de l'Epée*. Collection Tempus. Editions Perrin.

Naërt et al. 1922, volume 1, tome 1, annexe n° 113.

Deygas (capitaine F.J.) (1932), *L'armée d'Orient dans la guerre mondiale (1915-1919),* Paris, Payot.

François, D., François, G. (2017), *I want you. Le Corps expéditionnaire américain. France 1917-1918*. Orep Editions.

François, E., Schulze, H. (2007), dir. *Mémoires allemandes*, Paris, Gallimard. Bibliothèque illustrée des histoires.

Giovanangeli, N., Labaye, E., Ortholan, H. (2008), *1918. Le dénouement*, Paris, Editions Bernard Giovanangeli.

Grant, R. G. (2013), *1914-1918. L'Encyclopédie de la Grande Guerre*, Flammarion.

Jeanneney, J.N. (2013), *La Grande Guerre si loin, si proche. Réflexions sur un centenaire*. Le Seuil.

Lagrange, F. (2018), *A l'Est. La Guerre sans fin. 1918-1923*. Sous la direction de, Christophe Bertrand, Carine Lachèvre et Emmanuel Ranvoisy. Gallimard / Musée de l'Armée.

Le Naour Jean-Yves (sous la direction de) *1914-1918. L'intégrale*. Paris, Perrin, « Hors collection », 2018, p. 323-348. URL : https://www.cairn.info/1914-1918--9782262076542-page-323.htm. Le Naour, J. Y. (2018), *« Je les grignote », disait Joffre*

Le Naour, J.Y. (sous la direction de) (2014), *Dictionnaire de la Grande Guerre*, Larousse.

Loez, A. (dirigé par) (2020), *Mondes en guerre. Tome III. Guerres mondiales et impériales. 1870-1945*. Passés / composés. Ministère des Armées. Bruttmann, T.

Ludendorff (Général) (1932), Premier quartier-Maître Général des Armées allemandes. *Souvenirs de Guerre. Tome II.* Traduction intégrale et définitive, avec une préface du Général Buat, ex-Chef d'Etat-Major, général de l'Armée. Payot, Paris, 1932.

Mosier, J. (2001), *The Myth of the Great War: A New Military History Of World War 1*. Harper Editot. ISBN 13 : 9780060084332

Mosse, G. L. (1990). *Fallen soldiers : reshaping the memory of the world wars*, New York, Oxford University Press, 1990, 264 p. (ISBN 978-0-19-507139-9 et 978-0-195-06247-2, OCLC 815626741), traduit en français en 1999 sous le titre *De la Grande Guerre au totalitarisme. La brutalisation des sociétés européennes*.

Tuchman, B. (1967), *L'Autre Avant-Guerre. 1890 – 1914*. Paris, Plon,

Van Staëvel, E. (2006), *La pollution sauvage. A chacun ses pollutions*. Presses Universitaires de France.

Von Clausewitz, C. (1832), *De la Guerre*. Edition abrégée et présentée par Gérad Chaliant. Nouvelle traduction de l'allemand par Laurent Murawiec. Perrin. 2018.

Wanty, E., *La pensée militaire*, Bruxelles, Brespols, 1962.

Weinrich, A., Patin, N. (dir.), (2022), *Quel bilan scientifique pour le centenaire de 1914-1918 ?* Centre international de l'Historial de la Grande Guerre. Sorbonne Université Presses, Paris

Ouvrages thématiques

Première Guerre mondiale

Amat, J.P. (2015), *Les Forêts de la Grande Guerre. Histoire, mémoire, patrimoine*. Presse de l'université Paris – Sorbonne.

Bergerat, F., Gaviglio, P., Gély, J.P., Ginsburger, N., Labourguigne, J., et al. (2018), *14-18, la Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. AGBP-COFRHIGÉO-SGN, 10, pp.480, Mémoire Hors-série de l'AGBP, 978-2-9550042-1-0.

Bretislav, F., Hoffmann, D., Renn, J., Schmaltz, F. (2017), *One Hundred Years of Chemical Warfare: Research, Deployment, Consequences.* Martin Wolf Editors. Spiers, (i) Edward M., « *The Gas War, 1915–1918: If not a War Winner, Hardly a Failure* », (ii) Johnson, J. A. (2017), « *Military-Industrial Interactions in the Development of Chemical Warfare*, 1914–1918: *Comparing National Cases Within the Technological System of the Great War »,* (iii) Mac Leod, R. « *The Genie and the Bottle : Reflections on the Fate of the Geneva Protocol in the United States, 1918-1928* », (iiii) Kaufmann, D. « *« Gas, Gas, Gas! » The Poison Gas War in the Literature and Visual Arts of Interwar Europe* ».

Buchner, A. (1999). *Der Kampf um Vauquois. Band III.*

Cochet, F. (2006), *1916-2006, Verdun sous le regard du monde*. Soteca.

Doyle, P. (2017), *Disputed Earth. Geology and Trench Warfare on the western front. 1914-1918*. Unicorn Publishing Group.

Hubé, D. (2017), *14-18 Tremblements de guerre - Les géologues au coeur de l'histoire*. BRGM Editions.

Kennan, G. F. (1979), *The Decline of Bismarck's European Order. Franco-Russian Relations 1875-1890*. Princeton: Princeton University Press, 1979. https://doi.org/10.1515/9780691218274.

Laforgerie, E., Weiss, J.F. (2013), *Les souterrains de la Première Guerre mondiale - Tome 1, Du creusement au témoignage*. Ysec Editions

Lepick, O. (1998), *La Grande Guerre chimique 1914-19*18. Presse universitaire de France. Histoire. 384 p.

Lopez, J. (sous la direction de) (2022), *L'armée française. Deux siècles d'engagement*. Perrin. Grumberg, P., Goya, M., *1918, l'armée française au zénith. La belle armée de la République*.

Palat, Barthelémy-Edmond, général (1927), *L'Année d'angoisse 1917,* Paris, Berger-Levrault

Philpott, W. J. (2010), *Bloody victory : the sacrifice on the Somme and the making of the twentieth century,* London : Abacus, Collection internetarchivebooks.

Ritter, G. (1958), *The Schlieffen Plan : Critic of a Myth,* Londres, Oswald Wolff, 1958.

Rizzo, J.L., (2013), *Alexandre Millerand, socialiste discuté, ministre contesté et président déchu (1859-1943).* Paris, L'Harmathan

Terraine J. (1992), *White Heat: The New Warfare 1914-18*. Pen & Sword Books Ltd, 1992).

Willig, D. Rose, E., Heyse, I., Allermeier, C., Doyle, P. (2015), *Militärhistorisch-kriegsgeologischer Reiserführer zum Wytschaete-Bogen (Messines Ridge) bei Ypern (Belgien). Schriftenreihe Geoinformationsdienst der Bundeswehr. Heft 4*,

WWI Gas Shells of the German Army. Almanach Hachette, 1919.

Après-Guerre

Audoin-Rouzeau, S. (2008), *Sortir de la Grande Guerre. Le monde et l'après – 1918*. Editions Tallandier.

Cabanes, B. (2014), *La Paix et l'attente de la démobilisation. Finir la guerre. La victoire endeuillée. La sortie de guerre des soldats français. 1918-1920*., Editions du Seuil.

Clout, H. (1996), *After the ruins. Restoring the Countryside of Northern France after the Great War*, University of Exeter Press.

Danchin, E. (2015), *Le temps des ruines. 1914-1921.* Collection « Histoire », Presses Universitaires de Rennes.

Dautresme, D. (1919), *Les conséquences de la guerre en Seine-et-Marne: étude Historique, administrative et économique* (Melun: Legrand, 1919).

Li Ma (sous la direction de) (2012), *Les travailleurs chinois en France dans la Première Guerre mondiale*. CNRS Editions. Journal des Régions Dévastées, n°10, 20 juillet 1919. « La main d'œuvre chinoise ».

Pau, P., Jauffret J.C. (2016), *Le ballet des morts: État, armée, familles : s'occuper des corps de la Grande Guerre.* La librairie Vuibert.

Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*. Mainzer geographische Studien, Heft 45. Geographisches Institut Der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 1999.

Tardieu, A. (1921), *La Paix*. Préfacé par Georges Clémenceau. Présentation Georges-Henri Soutou. Editions Perrin (2019).

Déminage, désobusage

Wilson, T.D. (2024), *Le déminage en Normandie. 1944 – 1948*. Orep Editions.

Industrie de guerre

Fridenson, P., Griset, P. (2018), *L'industrie dans la Grande Guerre*. Institut de la gestion publique et du développement économique Comité pour l'histoire économique et financière de la France. Langlinay, E. *Les entreprises chimiques françaises et la Première Guerre mondiale* (p. 381-400).

Johnson, J.A., MacLeod, R. (2006), *Frontline and Factory : Compative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914-1924*. Springer.

Katthöfer, H. (1998), Die deutsche Rohrwaffenmunition im 1. Weltkrieg. Studie, In Bausinger, T. (2011).

American Battle Monuments Commission (1938), *American armies and battlefields in Europe. Washington*: Government Printing Office, In Bausinger, T. (2011).

Ministry of Munitions (1976), *History of the Ministry of Munitions. Vol. X: The supply of munitions: Part III: Gun ammunition: Shell manufacture*. Hassocks: Harvester, In Bausinger, T. (2011).

Ministry of Munitions (1976), *History of the Ministry of Munitions. Vol. XI: The supply of munitions: Part I: Trench warfare supplies. Hassocks: Harvester*, In Bausinger, T. (2011).

Ministry of Munitions (1976) ; *History of the Ministry of Munitions. Vol. XI: The supply of munitions: Part VI:* Small arms ammunition. Hassocks: Harvester, In Bausinger, T. (2011).

Explosifs et armements

Van Deuren, J., Wang, Z., Ledbetter, J., (1977), *Properties and Behavior of Explosives.* In: *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 3rd ed.* http://www.frtr.gov/matrix2/sectionl/toc.html [November 28, 2001].

Akhavan, J. (2004), *The Chemistry of Explosives. Published March 29th 2004 by Royal Society of Chemistry*.

Bausinger, T. (2011), *Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges*. Universität J. Gutenberg, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut, Mainz, 2011

Haas, R., Thieme, J. (1996), *Lexikon der deutschen Explosivstoffmischungen*. Extrait de *Bestandsaufnahme von Rüstungsaltlastverdachtsstandorten in der Bundesrepublik Deutschland. Band 2: Explosivstofflexikon*. 2. erweiterte Auflage, 378 S. UBA-Texte 26/96; Umweltbundesamt, Berlin 1996.

Köhler, Josef, Meyer, Rudolf (1991), *Explosivstoffe*. Verlag: Wiley-VCH.

Lafon, A., Miège, C. (2014), *Une guerre d'hommes et de machines. Désiré Sic. Un photographe du génie 1914-1918*. Editions Privat. Destins de la Grande Guerre.

Lejaille, A. (1999), *La contribution des pharmaciens dans la protection individuelle contre les gaz de combat durant la Première Guerre mondiale - Extension à la période 1920 -1940*. Thèse de doctorat en Pharmacie (Université Henry Poincaré - Nancy I).

Ortholan, H. (2020), *L'artillerie de la Grande Guerre. 1914-1918. Une arme en constante évolution*. Editions Soteca.

Reibert, T. (2013), *Die Entwicklung des Granatwerfers im Ersten Weltkrieg Die Entstehung eines neuartigen Waffentyps als Reaktion auf die Bedingungen des Stellungskrieges. Dissertation zur erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg vorgelegt im Fachbereich Mathematik.*

Schwarte (1920), *Die Technik im Weltkriege unter Mitwirkung von 45 Technikern und militärischen Fachwissenschaftlichen Mitarbeitern* herausgeben von M. Schwarte Generalleutnant z. D. Berlin, 1920. Ernst Siegfried, Mittler und Sohn.

Un milliard d'obus, des millions d'hommes. L'artillerie en 14/18, sous la direction éditoriale de Liénart éditions. Publié à l'occasion de l'exposition présentée du 21 mai au 5 décembre 2016 au musée de la Grande Guerre du Pays de Meaux. (i) Satyavane, D. et Pommer, C., *De l'artillerie cuirassée au char de combat. (ii) Berlemont, J., Matériels de l'artillerie.* (iii) *Renoult, P., Les munitions de l'artillerie française de la Grande Guerre*

Zabecki, T. D. (1994), *Steel Wind: Colonel Georg Bruchmüller and the Birth of Modern Artillery*. Praeger Publishers Inc (8 décembre 1994).

Littérature

1914-1918. Français et Allemands dans les tranchées. Librairie Générale Française, 2013. (i) Chevallier, G. (1930), « *La Peur »*. (ii) Jünger, E. (1920), « *Orages s'acier* », (iii) Barbusse, H. (1916), « *Le Feu. Journal d'une escouade ».*

Apollinaire, G. *Calligrammes. Poèmes de la paix et de la guerre (1913-1916)*. Gallimard (2014). « *Lueur des tirs. Chant de l'horizon en Champagne* ».

Céline, F. (1932), *Voyage au bout de la nuit*.

Dorgelès, R. (1923), *Le Réveil des Morts*. Albin Michel Editeur. Paris.

Racine, J. (1670) *Britannicus*, Acte IV, scène 4.

Valéry, P. (1919), *La Crise de l'esprit*.

Valéry, P. (1935), *Œuvres de Paul Valéry*. Éditions de la N.R.F., 1935 (5, p. 46-84). *Réponse aux remerciements du Maréchal Pétain à l'Académie Française*. Discours prononcé le 22 Janvier 1931.

Zweig, A. (1935), *L'Education héroïque devant Verdun*. Traduit de l'allemand par Blaise Briod. Distribué par le Cercle du Bibliophile. Librairie Plon, Paris. 1972.

Zweig, S. *Seuls les vivants créent le monde*. Bertrand Dermoncourt (commentateur (texte)), David Sanson (traducteur), 2018.

Presse et médias

Arte Télévision *Les Idées larges*. *Comment la guerre change notre rapport à l'environnement*, par Fabien Locher. EHESS, propos recueillis par Caroline Pernes publié le 09 décembre 2022.

Audoin-Rouzeau, S. (2020), *Nous ne reverrons jamais le monde que nous avons quitté il y a un mois*. Médiapart, 12 avril 2020.

Entretien avec Gerd Krumeich *« Il y a eu jusqu'au bout, un tel aveuglement…* » La Première Guerre mondiale. 2e partie. 1914-1918. Au cœur des grandes batailles. GEO Histoire n°13.

Archives (France)

Archives nationales

Archives nationales, site de Pierrefitte, cote C 7519. Langlinay, E. (2018) *Les entreprises chimiques françaises et la Première Guerre mondiale In L'industrie dans la Grande Guerre :* Colloque des 15 et 16 novembre 2016 [en ligne]. Paris : Institut de la gestion publique et du développement économique, 2018.

Archives Nationales, site de Pierrefitte, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, cote 94 AP 105. Pascal, P. (1925), Explosifs, poudres, gaz de combat, Paris, Hermann, 1925, p. 6. Pour une explication et un chiffrage plus détaillé, on se reportera à la note rédigée par Grimoux sur les approvisionnements du 8 mai 1917, Archives Nationales, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, cote 94 AP 105.

Archives Nationales, site de Pierrefitte, fonds Albert Thomas, site de Pierrefitte, cote 94 AP 103. Note sur la situation des approvisionnements en nitrate de soude, situation au 1er août 1917.

Archives Nationales, site de Pierrefitte, cote 470 AP 19, fonds Alexandre Millerand, accord franco-anglais du 15 août 1914, signé Messimy, Ministre de la Guerre, 26 août 1914.

Archives Nationales, site de Pierrefitte, cote F12 8030, Warren, De. E., Réorganisation des régions libérées, 27 mars 1919.

Archives nationales, site de Pierrefitte, cote 19970302/5. Von Spulnagel, Général d'Infanterie, Wiesbaden 05/08/1940. La CAA., E.M. n° 121/40

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF) (France)

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), cote B 29679. Malétra, contrat entre M. Mauclère, représentant le ministère de la Guerre d'une part et M. Trévoux, représentant des Établissements Malétra d'autre part, 5 février 1916.

Centre des Archives Economiques et Financières, site de Savigny-le-Temple, cote 43 25-1. Contrat pour la liquidation des stocks d'obus toxiques du dépôt de Spincourt. 17 septembre 1919. Entre le Sous-Secrétariat aux Finances (liquidation des stocks) représenté par M. Paul Morel d'une part, et MM : Clere & Schwander d'autre part. En manuscrit signé Clere Schwander et P. Morel.

Centre des Archives Economiques et Financières, site de Savigny-le-Temple, cote 43 25-1. Avenant du 20 septembre 1920, signé : Général Lequime, commandant d'artillerie du 6e C.A. et de la 6e Région. Approuvé à Paris le 11 octobre 1920 par le Sous-Secrétaire d'État aux Finances chargé de la Liquidation des Stocks.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035. Marché de démolition des munitions du Camp de Chalons. Exposé de la question et propositions du chef de section. 15 avril 1921.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035. F.N. Pickett & Fils, Démonteurs de munitions toxiques et explosifs à Monsieur le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions, Paris. Wimereux, le 22 mars 1921. Signé : Martin. Secrétaire.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), cote 4317-1, B 30035. Le Lieutenant-Colonel, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Chef du Service d'Apurement des comptes spéciaux du Trésor (Liquidation des stocks français), Metz, le 26 mars 1928. Signé illisible.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), cote 4317-1, B 30035. Courrier du Chef d'Escadron Cottel, Commandant le PAR de Metz à Monsieur le Ministre des Finances (Service d'apurement des comptes spéciaux du Trésor, Liquidation des stocks français) du 13 mars 1928.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1. Demande de saisie de cautionnement versé par la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques au titre de la Société Lorraine de Produits Industriels. Sous Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks, section Récupération.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote B 30035, 4320-1. Courrier de la Société Alsacienne de Produits Métallurgiques à Monsieur le Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks, Neuilly-sur-Seine, le 23 mars 1922. Signé : le Directeur, J. Blum.

Centre des Archives de Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote 4317-1, B 30035. Examen des projets de contrats pour la destruction des munitions des dépôts français de la 6e Région. 1er avril 1921 n°313 (manuscrit). Signé : Lepelletier.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 4317-1, B 30035. Règles techniques- article 18 du contrat Aigret & Sauron pour la démolition des munitions entreposées au Camp de Chalons 6e Région militaire du 30 octobre 1920.

Centre des Archives de l'Economie et des Finances (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 4317-1, B 30035. Article 18 du contrat Aigret & Sauron pour la démolition des munitions entreposées au Camp de Chalons 6e Région militaire du 30 octobre 1920.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote 1644. Le Général Bunoust, Commandant l'Artillerie du VIe Corps d'Armée et de la 6e Région à Monsieur le Sous-Secrétaire d'Etat de la Liquidation des Stocks, Section Artillerie. Châlons-sur-Marne, le 14 octobre 1921.

Centre des Archives Economiques et Financières (CAEF), site de Savigny-au-Temple, cote B-29713. 20e Région, Artillerie. Le Général Aldebert, Commandant par intérim l'Artillerie du 20e Corps d'Armée à Monsieur le Général Commandant le 20e Corps d'Armée. 4e Bureau. Nancy le 23 août 1921.

Centre des Archives Economique et Financières (CAEF), site de Savigny-le-Temple, cote 4317-1, B 30035. Le Lieutenant-Colonel, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Chef du Service d'Apurement des comptes spéciaux du Trésor (Liquidation des stocks français), Metz, le 26 mars 1928. Signé illisible.

Service Historique de la Défense (SHD)

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 51. Secrétariat d'Etat de l'Artillerie et des Munitions. Réponse aux questions posées par le Général Pedoya, Président de la Commission de l'Armée de la Chambre des Députés (lettre du 1er mars 1916).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 51. Sénat. Ve rapport fait à la Commission de l'armée sur les Poudres et Explosifs de Guerre par Henry Berenger, Sénateur (adopté le 20 mars 1916).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 4 W 713. Archives de l'artillerie. Corbin M.P., administrateur – délégué de la « Société Universelle des Explosifs ». Conférence sur les explosifs chlorates et perchlorates au centre d'instruction de la pyrotechnie à Bourges à M.M les Officiers bombardiers. 1er juillet 1915.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 409 – 10. Note au sujet des explosifs chlorates et perchlorates. Daté (manuscrit) : 6 juillet 1915.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 409-10. Note au sujet des explosifs chlorates et perchlorates. Daté (manuscrit) : 6 juillet 1915.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Sénat. Rapport fait à la commission de l'armée sur le fonctionnement des poudreries du Finistère (Moulin Blanc et Pont de Buis) par M. Boudenot (Adopté le 3 août 1916).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 205 (170). Etat-Major de l'Armée. 2e Bureau I. Section économique. La question de l'azote dans les Empires Centraux. 18 octobre 1917. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 58. Sous-Secrétariat d'Etat de l'Artillerie et des Munitions. Cabinet. Service Technique. Réponse aux questions posées par M. Henry Berenger, Membre de la Commission Sénatoriale de l'Armée. Poudres & Explosifs. 24 août 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Chambre des Députés. Commission de l'Armée. Deuxième rapport sur les matières premières destinées aux fabriques d'explosif sur le nitrate de soude et l'acide nitrique. Présenté à la Commission de l'Armée par M. Pierre Renaudel, Député. 2 février 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 10 N 58. Observations du Ministre de l'Armement & des Fabrications de Guerre au sujet du rapport fait à la Commission sénatoriale de l'Armée sur les poudres,

explosifs & produits chimiques de guerre par M. Henry Berenger, Sénateur (Adopté le 8 novembre 1916). p.17.

Service Historique de la Défense, site de Vincenne, cote 4 W 713, Ministère de la Guerre. 6e Direction. Poudres & Salpêtres. Poudrerie nationale de Saint-Chamas. Description des procédés de fabrication des explosifs azotés à la Poudrerie de Saint-Chamas (Livret d'inspection de 1909). 31 janvier 1910. Signé : Le Directeur (illisible).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur l'accident survenu aux ateliers de chargement du Polygone le 18 mars 1899. N°31 – 19 avril 1899.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 895. *Tonindustrie – Zeitung*. Versorgung der Steinbruchbetriebe mit Sprengstoffen im Kriege. Berlin NW 21, Sonnabend, den 14. Juni 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 244. Extrait d'un rapport sur l'état des productions des poudres et explosifs adressé au Général d'Armée Camille Walch. Non signé, non daté. 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 58, Principaux explosifs employés au chargement des projectiles d'artillerie. Non daté.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 28. Statistiques : graphiques des productions de matériels et munitions ; de la production et des importations de poudres, explosifs, produits chimiques de guerre, fontes et aciers ; de la consommation et des stocks de munitions ; des accidents de tir de 75 (registre d'Albert Thomas). 1914-1918.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 10 N 7. Rapport fait à la Commission de l'Armée sur les poudres et explosifs par H. Bérenger, sénateur, en mars 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Sénat. « Rapport fait par la commission de l'Armée sur deux corps asphyxiants nouveaux utilisés par les Allemands (le sulfure d'éthyle bichloré et le chlorure de diphénylarsine » par M. Cazeneuve (adopté le 16 janvier 1918).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes. Évaluation des besoins par le Ministère de la Guerre (1915). Une solution à la question des explosifs. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Le Chef de bataillon Frossard. Commandant le Génie de la XXVe Division à Monsieur le Général Commandant la 25e Division. Compte rendu. Le Ier octobre 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 898. Capitaine Billard. Effets du tir de l'artillerie sur les organisations défensives. Janvier 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Rapport sur la méthode employée par l'Armée britannique pour la récupération de matériel abandonné. Non daté.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN4-411. Note du GQG (Direction de l'Arrière) du 31 août 1916 à l'attention de la 2e Section du Comité Interministériel (Reconstitution des Régions envahies ou atteintes par les faits de guerre).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4-411. Ministère de la Guerre au Comité Interministériel pour Aider à la Reconstitution des Régions dévastées. 2e Section – Reconstitution du sol, des voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale. Note au sujet des conditions dans lesquelles pourrait être exécutés la démolition des travaux défensifs (abris souterrains, tranchées bétonnées, etc.). 26 octobre 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Enlèvement de projectiles. Note pour la 2e Section du Comité Interministériel (Reconstitution des régions envahies ou atteintes par les faits de guerre). Au GQG, le 31 août 1916. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 411-7. Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies. IVe Section. Rapport présenté au Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies sur l'organisation d'un « Service spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi ». Non daté. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 396. Courrier du 23 février 1918 au général chef de la Mission militaire française attachée à l'Armée britannique.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport sur la réorganisation du système de récupération de matériel des armées britanniques en France. Non signé. Non daté.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161. Résumé. Règlement sur le ramassage des objets à récupérer (IIIe Armée allemande). 24 février 1917. GQA, le 3 février 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 939. Extrait du B.R. de l'armée britannique, du 14 juin 1917. Economie de munitions chez l'ennemi. Traduction d'un ordre secret de la IV^{e}Armée allemande, du 11 avril 1917. Signé. Sixt v. Armin.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161.Le service de récupération des matériels dans l'armée allemande (étude faite par la Ire Armée). GQG des Armées du Nord et du Nord-Est, le 27 juillet 1918. Traduction de la brochure allemande de 1917 intitulée « Die Sammeltätigkeit beim Feldheer ».

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 NN 161. Résumé. Règlement sur le ramassage des objets à récupérer (IIIe Armée allemande). 24 février 1917. GQA, le 3 février 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 7 N 939. Ordre du VIIIe C.R-II & 18 mai-8 juin ; 50e Division, 30 juin ; 50e Ble. Art-12/10). Etat-major Général. 2e Bureau. Au GQG, le 28 novembre 19015. Annexe au bulletin de renseignement du 28 novembre. Mesures d'économie prises par l'administration militaire allemande.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 82. Ministère de la Guerre, contrôle de l'Administration de l'Armée. 1er Région. Enquête sur les marchés de récupération et de désobusage. Rapport Particulier. Fait par M. Rebouet. Contrôleur de 1er Classe. 29 npvembre 1928. Signé : Rebouet.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Instructions sur la récupération du 3 mai 1918. Signé : Georges Clemenceau.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4-411. Le Ministre de la Guerre à Monsieur le Ministre de l'Intérieur (Service Spécial pour la Reconstitution des Régions envahies). 22 avril 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 4 411-0R. Poincaré. Président de la République française Décret du 18 août 1917. Comité Interministériel pour aider à la reconstitution des régions envahies. Rapport sur l'organisation d'un « Service Spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi » du 27 juin 1917, et ses annexes.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. 4e Direction – Génie. 1er Annexe au Rapport du 27 juin 1917. Comité Interministériel pour aider à la reconstitution des régions envahies. 2e Section – Reconstitution du sol, voies de communication, des conditions essentielles de la vie locale. Note au sujet des conditions dans lesquelles pourrait être exécutées la démolition des travaux défensifs – (abris souterrains, tranchées bétonnées, etc.). Paris, le 26 octobre 1916.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 N 403. Ministère de la Guerre. Instruction sur la récupération du matériel militaire et des épaves dans les armées. Présidence du Conseil ; Sous-Secrétariat d'Etat ; Office interministériel du 7 mars 1918. Signé : le Lieutenant-Colonel, Président de la conférence, Wildermuth. La conférence interministérielle déboucha sur les Instructions du 3 mai 1918 signées Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre, Georges Clemenceau.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 411-7. Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies. IVe Section. Rapport présenté au Comité Interministériel pour aider à la Reconstitution des régions envahies sur l'organisation d'un « Service spécial pour la remise en état du sol des régions reconquises sur l'ennemi ». Non daté.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG, le Général de Division Maistre, Commandant le Groupe d'Armées du Centre à Monsieur le Général Commandant en Chef du 30 octobre 1918. Signé illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général de Division De Castelnau, Commandant le Groupe d'Armée de l'Est à Monsieur le Général IGA. QG le 29 octobre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport sur la réorganisation du système de récupération de matériel des armées britanniques en France. Non signé. Non daté.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur les dispositions prises pour la destruction des obus de 270 de 3 calibres, restés dans l'enceinte de l'Ecole après l'explosion du 10 octobre 1890. 21 novembre 1890.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre. Renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques. Le Lieutenant-colonel d'artillerie (signé : illisible). 10 août 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu. D.E. de Dunkerque, Inspection des Munitions n° 670/C du 21 décembre 1918. Signé. P. l'Inspecteur des Munitions. Le Lieutenant Boy, Officier-Chimiste adjoint.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Colonel en Chef de la Mission Belge au GQG Français à Monsieur le Maréchal de France du 12 mars 1919. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 12 novembre 1918. Signé : Régnier.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Général de Division Debeney commandant la Ire Armée à Monsieur le Maréchal de France. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 3 mars 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte Rendu d'une inspection faite le 21 et 22 janvier par le Chef d'escadron inspecteur de la récupération. GQG, le 23 janvier 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère du blocus et des régions libérées. Office de la Reconstitution Industrielle des départements victimes de l'invasion. Le Ministre du blocus et des régions libérées à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Enlèvement d'engins abandonnés par l'ennemi. Paris, le [?] novembre 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Télégramme entré à la D.A. le 27 mars sous le n° 2646. Au GQG, le 29 mars 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr Bechmann, Filature – tissage et Teinturerie E. Bechmann & Cie à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle du 11 mars 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du XXIe Corps d'armée, Epinal, le 15 mars 1919 au GQGDA. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Lieutenant-Colonel Taffanel, Secrétaire Général de l'Office pour la Reconstitution Industrielle à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef des Armées Alliées, Direction de l'Arrière, du 6 janvier 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lettre du Capitaine Forveiller, Commandant le Détachement de Thionville à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle, du 27 janvier 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG des Armées Françaises de l'Est du 2 avril 1919. Signé : Major Général Buat.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586[1]. Courrier du GQG du 8 janvier 1919 au Chef de la Mission Belge près du DGCRA. Signé : Renon.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Maréchal de France Commandant en Chef les Armées françaises à Monsieur le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées alliées. Décembre 1918.

Service Historique de la Défense. 1er Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Au sujet de l'explosion d'Audruicq.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. p.2. Ministère de la Guerre. 2e et 13e Régions. Service de l'Artillerie. Libération des terrains occupés. Rapport particulier fait par M. Gras contrôleur de 2e classe. 5 mai 1921.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lieutenant-Général Gillain, Chef d'Etat-Major Général de l'Armée belge au Général de Division, Chef de la Mission Militaire Française auprès de l'Armée belge, courrier du 26 novembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 895. 21e Régiment du Génie. Section de Projecteurs 113. 10 novembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 1KT25. Guerre de mines de la Chapelotte. Par le Capitaine Grandidier.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Inventaire du Matériel d'Artillerie et des Munitions laissées par l'ennemi sur le territoire de la Xe Armée.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Etat des munitions existant à l'Arsenal d'Haguenau. 5 décembre 1918. Le Général Commandant la VIIIe Armée. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Etat des dépôts de bombes d'aviation de provenance allemande existant sur la place de Strasbourg. PAR de Strasbourg le 3 mars 1919. Signé Illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16N 2586. Paris (non daté). Le Ministre des Régions Libérées à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau], Etat-Major de l'Armée – 1er Bureau. Signé : Lebrun.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 16 janvier 1919. Note. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 11 janvier 1919. Note 218. Signé : P.O. Le Major Général Buat.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du 3 mars 1919 du Cabinet Civil du Ministre de la Guerre, à l'attention de M. le Maréchal de France, Commandant en chef.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr Le Préfet de l'Aisne, Laon, du 20 mars 1919 à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du 5 mars 1919 du Chef du Cabinet Civil du Président du Conseil, Ministre de la Guerre au Maréchal Commandant en Chef (confirmation de message téléphoné le 27-2-19, à 19H.40).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du Général, Directeur général des transports militaires à Monsieur le Maréchal de France Commandant en Chef des Armées Françaises du 11 mars 1919.

[1] Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG Note. Munitions dangereuse à proximité des voies ferrées. Grand Quartier Général des Armées françaises de l'Est. Etat-Major. Direction de l'Arrière, à l'attention du Général des Armées Fayolle – Armées – Régions Frontières. 2 avril 1919. Signé P.O. le Major Buat.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 8 janvier 1919 au Chef de la Mission Belge près du DGCRA. Signé : Renon.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR16 N 2586. Message reçu le 14 mars 1919 à 21H40. Président Commission Interministérielle à Maréchal Foch.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG, le 16 janvier 1919. Note. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQGA, le 11 janvier 1919. Le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées (DGCRA) à Monsieur le Maréchal de France, commandant en Chef les Armées Françaises (DA). Signé : P.O. le Major Général Weygand.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Rapport du Capitaine Commandant la Gendarmerie de l'arrondissement sur une explosion de munitions. Valenciennes, le 25 mars 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier de Mr le Directeur de la Société Anonyme des Mines d'Amermont-Dommary à Bouligny (Meuse) à Mr Pinot, Secrétaire Général du Comité des Mines de Fer de Meurthe-et-Moselle, Paris.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courier des Société des Fourneaux de Saulnes à Monsieur le Ministre de la Reconstitution Industrielle du 20 décembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Télégramme n°6000 / B E.M. du 01 février 1919 au GQG.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Au GQG le 5 février 1919. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction sur les travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Année 1930. 1er Région. Place de Douai. Rapport particulier n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n° 6.171/DA. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées du 19 novembre 1918. Signé : P.O. L'Aide-Major Général M. Duval.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. La note sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918. Signé : Le Général I.G.A, Herr.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG du 30 novembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Rapport sur la marche du Service de Récupération (Mois de Janvier). GQG, le 30 janvier 1919. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note pour les Armées. Au GQG le 29 novembre 1918. Signé : P.O. L'aide-Major Général. Régnier.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note n°327/A du 28 novembre 1918. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille n°3.171 du GQG du 7 décembre 1918. Signé : Le Général I.G.A, Herr.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note. Au GQG, le 19 janvier 1919. Pour le général commandant en chef et par son ordre. Le général IGA. Signé : Herr.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Cette archive se place dans un ensemble d'écrits / d'archives daté(e)s entre décembre 1918 et janvier 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu des Opérations de Récupération pendant la 2e Quinzaine de novembre 1918. GQ G le 30 novembre 1918. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Compte-rendu. Le Lieutenant-Colonel Toussaint, Commandant la zone de récupération à M. le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées Françaises. Le 30 novembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Traduction de la note de la Ier Armée. Transmis à M. Le Maréchal commandant en Chef les Armées du Nord et du Nord Est. Non daté (probablement fin 1918).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Dunkerque, le 17 décembre 1918. P.O. le Chef d'Etat-Major, Guény.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. D.E. de Dunkerque. Inspection des munitions, le 21 décembre 1918. Compte-rendu.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. D.E. de Dunkerque. Inspection des munitions, op. cit.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef (Grand Quartier Général – Artillerie), rapport n°9 « Constatations relatives à la récupération » du 29 novembre 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à M. Maréchal de France, Commandant en Chef, GQG (artillerie). Nancy, le 18 janvier 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Général Lepelletier, Inspecteur Général des Munitions aux Armées à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef (Grand Quartier Général – Artillerie), rapport n°9 « Constatations relatives à la récupération » du 29 novembre 1918.

Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les Régions Libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 2586. Guide à l'usage des officiers chargés de diriger et de surveiller les opérations d'enlèvement et de destruction de munitions.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 2586. GQG janvier 1919. Note. Signé : Vinot.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 2586. Note pour la section main d'œuvre du 20 décembre 1918. P.O. Le Sous-Chef d'Etat-Major. Signé : Colson.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Paris, le 5 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef les Armées Alliées [ndlr : Foch]. Signé : Le Général Chef du Cabinet Militaire. Mordacq.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16N 2586. Récupération et reconstitution dans les Régions Libérées. Paris, le 5 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Commandant en Chef les Armées Alliées [ndlr : Foch]

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. Récupération de projectiles non éclatés. Paris, le 25 mars 1919. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre (Cabinet militaire) [ndlr : Clemenceau] à Monsieur le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Commandement en chef des Armées Alliées. Etat-Major Général. Au GQGA le 23 mars 1919. Le Maréchal Foch, Commandant en chef les Armées Alliées (DGCRA) à Monsieur le Maréchal de France Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GG, le Général de Division Maistre, Commandant le Groupe d'Armées du Centre à Monsieur le Général Commandant en Chef du 30 octobre 1918. Signé illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à M. le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées françaises de l'Est. Paris le 13 mars 1919. Signé : pour le Président du Conseil, Ministre de la Guerre et sur son ordre. Le Général Directeur de l'Artillerie. Illisible. Dépêche remise au Général Mangin et au Commandant Colson (manuscrit).

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Lettre du Ministre de la Reconstitution Industrielle n°4002 ORI/4 du […] mars a/s d'obus à gaz abandonnés par l'ennemi dans les usines de la société anonyme d'Auberive à Villerupt. Transmise par l'Artillerie GQG n°552 IGA du 27 mars.
[1] Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1184 W 696. Courrier du 16 juillet 1920 du conservateur des Eaux & Forêts à la Direction générale des Eaux & Forêts.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du 3 mars 1919 du Cabinet Civil du Ministre de la Guerre, à l'attention de M. le Maréchal de France Commandant en chef.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. GQG. Etat-Major. Direction de l'Arrière. Instruction au sujet des Travaux de récupération et de reconstitution dans les régions libérées. Non signé. Non daté, possiblement fin 1918 ou début 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note du GQG n° 3.071 / GDE du 7 décembre 1918 sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. La note du GQG n° 3.071 / GDE du 7 décembre 1918 sur la Récupération des Munitions dans les anciens champs de bataille.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Le Maréchal Foch, Commandant en Chef les Armées Alliées à Monsieur le Maréchal, Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est (Pétain ?), du GQGA du 5 mars 1919. P.O. le Major Général Weygand.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Courrier du 21 janvier 1919 du Maréchal de France Commandant en Chef des Armées Françaises de l'Est à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Paris. Signé. Régnier.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, Matériel, 8e Section. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à Monsieur le Maréchal de France, Commandant en Chef les Armées Françaises de l'Est. Récupération et destruction de projectiles et de munitions déclassées. Paris, le 13 mars 1919.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 8 N 120. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'Administration de l'Armée. 2e, 6e, 7e et 20e Régions. Places diverses. Service de l'Arrière. Désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport Particulier. Fait par M. Macherat. 10 novembre 1930.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 92. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, 2e Bureau, Matériel. Monsieur le Contrôleur de l'administration de l'Armée Rebouet. 12, rue d'Ouessant, Paris (15e). Note au sujet des marchés futurs pour la récupération sur les anciens champs de bataille. Paris, le 22 octobre 1928. Signé : Rebouet.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 8 N 120. Ministère de la Guerre. Contrôle de l'administration de l'Armée. Service de l'Artillerie. Désobusage (fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Rapport particulier fait par M. Macherat. 2e, 6e, 7e et 20e Régions, places diverses. 10 novembre 1930.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Ferrailles et vieux métaux. E. & H. Meyer et Delaire à Monsieur le Colonel Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz. Verdun, le 15 janvier 1931. Signé : le Directeur, Ricome.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Savot Frères & Cie. Albert, le 9 juillet 1931. A Monsieur le Ministre de la Guerre.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN3-675. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie. Monsieur le Ministre de la Guerre à M. le Général Commandant l'Artillerie de la 6e Région, Paris le 3 mai 1930. Marchés de récupération.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Parc d'Artillerie Régional de Metz. Projet d'avenant au marché de récupération. Metz le 4 décembre 1931. Le Lieutenant-Colonel Cottel, Commandant provisoirement le PAR de Metz.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Société anonyme des entreprises Géré à Monsieur le Général de Division, Commandant l'Artillerie du 6e Corps d'Armée. Metz. Le 10 avril 1930. Signé : illisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. Entreprise Alexandre Mazelier. Désobusage & Récupération du département de la Marne. A Monsieur le Général de Division Charet, Commandant l'Artillerie du 6e Corps d'Armée à Metz (Moselle). Reims, le 12 avril 1930.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. 6e Région. Commandement de l'Artillerie. Le Général de Division Charet, Commandant l'Artillerie de la 6e Région à Monsieur le Ministre de la Guerre, 3e Direction. Metz, le 22 avril 1930. Signé : ilisible.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-674. La seule référence archivistique identifiée, attestant de la destruction d'engins chimiques en Meuse vers 1929, est la plainte du Maire de Brandeville (au nord-ouest de Verdun) du 17 mai 1929 au sujet des risques liés au pétardement, vidage et brûlage des obus chimiques très près des habitations de cette commune.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Rapport particulier n°7/30 du 10 novembre 1930 au sujet du désobusage (Fonctionnement actuel et améliorations qui paraissent s'imposer). Non signé.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Note. Au GQG, le 19 janvier 1919. Pour le général commandant en chef et par son ordre. Le général IGA. Signé : Herr.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN3-675. Réfection des munitions ex-allemandes stockées dans les places de Metz, Thionville et Strasbourg. 2e rapport de mission du capitaine Grangier de l'École de pyrotechnie, 18 mai 1933.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 9 NN 3-675. Réfection des munitions ex-allemandes stockées dans les places de Metz, Thionville et Strasbourg. 2e rapport de mission du Capitaine Grangier de l'Ecole de Pyrotechnie. 18 mai 1933.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 2586. Base française d'Italie, Parc Annexe d'Artillerie. Le Chef d'Escadron Scherer Commandant le P.A. de la Base à Monsieur le Commandant de la Base Française d'Italie. Milan, le 29 janvier 1919. Signé : Scherer.

Service Historique de la Défense. Année 1930. 1re Région. Place de Douai. Rapport particulier de la place de Douai n°2/30 du 21 mars 1930 sur le Service de l'Artillerie, désobusage.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, côte GR 5 N 266. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie. Note pour l'Etat-Major de l'Armée. Bureau de l'Organisation et de la Mobilisation. Emploi des gaz asphyxiants et des engins qui s'y rapporte. Paris le 10 juillet 1919. Signé : Maurin. Le Général. Directeur de l'Artillerie.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 10. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 25 novembre 1918. Rapport relatif des obus à + bleue de différents calibres. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 11. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 12 novembre 1918. Rapport relatif à un obus de 10,5 à + bleue. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 17. 21 cm Blue Cross shell. Central laboratory BEF, 11th october 1918. Signé : W. Watson, Lt. – Colonel, Director.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 - 49. Laboratoire Municipal de Chimie. Section des Etudes Chimiques de Guerre. Paris, le 27 juillet 1918. Rapport relatif à un obus de 10,5 contenant des arsines aliphatiques halogénées (obus à + jaune 1) et à des caffûts d'obus du même type. Signé le Directeur du laboratoire, A. Kling.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 NN 161 43. British Mission. 13 août 1918. 15 cm Blue cross shell, blind, received from C.A. Third Army. Fioles renfermant 800 gr d'arsines.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Groupement z. 9e Division. Génie. Rapport du Chef de Bataillon, Commandant le Génie de la 9e D.I. Le 10 juillet 1916. Signé : Arlabosse.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée. Etat-Major. 2e Bureau. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée. Etat-Major. 2e Bureau. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Canevas de tir.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Mémoire concernant les opérations de guerre de mine à la IIe Armée (Notre SC/n°994 du 10 avril 1915 de M. Le Général Commandant l'Armée). Au GQG, le 30 avril 1915.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Mémoire concernant les opérations de guerre de mine à la IIe Armée (Notre SC/n°994 du 10 avril 1915 de M. Le Général Commandant l'Armée). Au GQG, le 30 avril 1915.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. Ordre particulier pour le commandement du Génie de la 9e D.I. GQG, le 20 juin 1916. Signé Tirrier.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, archives du Génie, cote GR 2 V 218. XIIIe Corps d'Armée, Etat-Major. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 16 N 895. 21e Régiment du Génie. Section de Projecteurs 113. 10 novembre 1918.

Archives départementales de l'Aisne

Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote 22 R 2-497. Coucy. Le Lieutenant-Colonel Beaufeist, Commandant le Parc d'Artillerie Régional de la Fère aux Maires. La Fère, le 18 décembre 1933.

Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote 22 R 2-497. Coucy. Ministère de la Guerre. Artillerie. Parc d'Artillerie Régional de La Fère. 2e Avenant au cahier des charges spéciales relatif à un marché de récupération des munitions et des épaves de guerre existant dans la 2e Région à la date du 1er janvier 1930, concernant le 2e Secteur (Aisne et Arrondissement de Mézières), approuvé par D.M., n° 79. 928-2/3 du 15 novembre 1929. La Fère, le 28 janvier 1932. Signé : le Lieutenant-Colonel Beaufist.

Archives départementales de l'Aisne, site de Laon. *Les Tablettes de l'Aisne*, 24 décembre 1922.

Archives départementales de l'Aisne, site de Laon. *Les Tablettes de l'Aisne*, 27 mars 1921.

Archives départementales de l'Allier

Archives Départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 2 R 12. Gendarmerie Nationale. Rapport du Capitaine Joly, Commandant l'Arrondissement de Moulins sur un incendie à l'entrepôt de munitions de la Ferté-Hauterive. Moulins, le 26 mai 1922.

Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. La Ferté-Hauterive (Allier). Etablissement Bouxin.

Archives départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 5 M 2057. Ministère de la Guerre, Marché de gré à gré pour la démolition d'obus spéciaux stockés à l'Entrepôt de Réserve Générale de la Ferté-Hauterive. Passé en exécution du §5 de l'article 18 du décret du 18 novembre 1882. Le présent marché a été approuvé par décision ministérielle n° 77950 – 2 / 3 du 24 octobre 1922. La Ferté Hauterive, le 25 novembre 1922.

Archives Départementales de l'Allier, site de Moulins, cote 2 M 2057. Ministère de la Guerre, Direction, 2e Bureau. Marché de gré à gré pour la démolition de d'obus spéciaux stockés à l'entrepôt de réserve générale de la Ferté-Hauterive. Le 3 septembre 1923.

Archives départementales du Bas-Rhin

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Communiqué de presse du 22 décembre 1921 « Situation des dépôts de munitions dans les trois départements recouvrés » Communiqué de presse du 22 décembre 1921 « Situation des dépôts de munitions dans les trois départements recouvrés » Signé : Hurst.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Metz le 3 janvier 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général de Division de Boissieu, Gouverneur Militaire de Strasbourg, Commandant supérieur du Territoire d'Alsace à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg du 29 octobre 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire, Commandant le Parc d'Artillerie de Strasbourg à M. le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace – 1re Section. Dépôts de munitions à proximité des voies ferrées. Strasbourg, le 26 juillet 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Instruction sur les services de récupération et reconstitution dans le territoire du Commandement Supérieur de Lorraine. Au GQG, le 23 février 1919. Le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace. Signé : de Maud'Huy.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Boeglin. Commandant l'Arrondissement de Mulhouse, sur l'explosion d'un obus. 21 mars 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République, Direction des Affaires militaires. Colmar le 10 novembre 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général Marchal, commandant l'artillerie du XXIe Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République du 5 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Rapport de l'Officier d'Administration, Chef artificier Michel du Parc d'Artillerie Régional de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munitions du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier du Préfet du département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) du 22 juillet 1920.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Rapport de l'Officier d'Administration, Chef artificier Michel du Parc d'Artillerie Régional de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munitions du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Parc d'artillerie régional de Metz. Le Lieutenant-Colonel Chardon. Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Commissaire Général de la République (cabinet Alexandre Millerand.) à Strasbourg. 8 avril 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général de Division Berthelot, Gouverneur militaire de Metz, Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine, Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République, Strasbourg du 6 avril 1920.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Parc d'artillerie régional de Metz. Le Lieutenant-Colonel Chardon. Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Commissaire Général de la République (cabinet Alexandre Millerand) à Strasbourg. 8 avril 1922.

Archive départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Secrétariat Général, service des investigations. L'accident de l'Hartmannsweiler. Coupure de presse. Non datée

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Lettre mémoire datée du 7 janvier 1922 de Mr le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin concernant le dépôt de munitions et l'usine ex-allemande du MA3 (Munitionsanstalt n°3) d'Illkirch-Graffenstaden.

Archives départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. *Le Lorrain* du 30 juin 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Préfecture du Bas-Rhin. Le Préfet du département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) à Strasbourg. Dépôt de munitions de Keskastel. Strasbourg, le 22 juillet 1920. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402 *La Dépêche de Strasbourg* du 21 janvier 1921. *Près d'un volcan. Un camp de munitions "oublié" près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes !*

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Affiche bilingue pour la prévention des risques liés aux engins de guerre ancien abandonnés sur les lieux de tourisme mémoriel en Haute-Alsace. Commissariat Général de la République, Strasbourg, le 15 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, Ire Section. Le 6 avril 1921. Signé : Salvaire.

Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras, cote 1 W 1653. Correspondances.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Liste des dépôts de munitions présents sur le sol d'Alsace-Lorraine au début 1919, établie en date du 11 octobre 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Instruction sur le service de récupération et reconstitution dans le territoire du commandement supérieur de Lorraine. Signé du Général de Maud 'Huy. 23 février 1919

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. L'accident de l'Hartmannsweiler. Coupure de presse annotée par le Haut-Commissaire de la République, Alexandre Millerand. Non daté.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Général de Division Berthelot. Gouverneur Militaire de Metz. Membre du Conseil Supérieur de la Guerre à Monsieur le Commissaire Général de la République. Strasbourg. Metz, le 6 avril 1920.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'escadron Salvaire Commandant le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, 1er Section. Avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Liste des dépôts de munitions évacués en 1918 et 1919 et non compris dans les travaux dont le maintien provisoire a été demandé par le Parc d'Artillerie Régional de Metz. Metz, le 3 janvier 1922. P.O. le Chef d'escadron. Signé : illisible.

Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402. Courrier du 20 octobre 1928 de la Direction du Service des Dommages de Guerre et de la Reconstitution à Monsieur le Mr le Chef de Bataillon Hurst, Commissariat Général de la République à Strasbourg.

Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Maturier commandant la 4e Batterie du 85e Régiment d'Artillerie Lourde à Monsieur le Commandant le 85e RAL.

Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport du Capitaine Ruffier, Commandant de Gendarmerie de l'Arrondissement de Colmar du 11 octobre 1923.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Note pour la Direction –Service des Travailleurs Coloniaux – Paris. Direction de l'Artillerie. P. le Ministre et P.O. Le Général Directeur de l'Artillerie P.O. AL le Chef du 2e Bureau : signé : Gotier.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Lieutenant-Colonel Chardon, Commandant le Parc d'Artillerie de la Place de Metz à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire de Lorraine à Metz. Metz, le 21 avril 1921. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. 21e Corps d'Armée. Commandement de l'Artillerie. Etat-Major. Le Général Maréchal Commandant l'Artillerie du 21e Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg. Epinal, le 9 avril 1922. Signé : Maud'Huy.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement militaire de Strasbourg. Service des Munitions. Le Lieutenant Decaussin, chargé du Service du désobusage de la Subdivision de Mulhouse, Colmar à Monsieur le Chef d'Escadron Commandant le Parc d'Artillerie de Strasbourg. Rapport au sujet du Service de désobusage, Subdivision de Mulhouse et Colmar. Strasbourg, le 23 juillet 1921. Signé Decaussin.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Directeur de la Société Lorraine de Produits Industriels de Thionville (Moselle) à Monsieur le Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks. Marché relatif à la démolition des munitions de Lorraine. Thionville le 22 mai 1921. Signé : Soubielle.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. L'inspection divisionnaire du travail d'Alsace et de Lorraine à Monsieur le Lieutenant-Colonel Jost de Stael, Commandant le Parc d'Artillerie de Place à Strasbourg. 20 septembre 1920. Signé : l'Inspecteur divisionnaire

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar le 25 mars 1921. Signé : Charles Valette.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar le 17 juin 1922. Signé : Charles Valette.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cotes 121 AL 402 et 121 AL 408. Correspondances.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Ministère de l'Intérieur. Commisariat spécial de police., Mulhouse (Haut-Rhin). Obus à gaz asphyxiants dans la forêt de la Hardt. Rapport. N°3831. Envoyé à : Direction Strasbourg, Préfet, Sous-Préfet. Mulhouse, le 8 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Monsieur le Préfet du Haut-Rhin, à Monsieur le Commissaire Général de la République à Strasbourg. Courrier du 17 juin 1922. Signé : Charles Valette

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant P.I. le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, Ier Section. Strasbourg, le 6 avril 1921. Signé : Salvaire.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Republikaner de Mulhouse (en langue allemande). titrant « *Opfer der Profitsucht. Über 40 schwere Unfälle, drei Tote in einem halben Jahr* », relayé en juin 1922 par l'Echos de Paris. Traduction « Victime de la quête du profit. 40 accidents graves, trois morts en une demi année ».

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Courrier de Monsieur le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur de Commissaire Général de la République à Strasbourg. Colmar, le 15 juin 1920. Signé : Valette.

Archives départementale du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. *Le Republikaner* de Mulhouse *l'Echos de Paris*, op. cit.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Haut-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République. Colmar, le 25 mars 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Commissaire Général de la République au Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (section Artillerie). Paris 16e. Strasbourg le 19 mai 1921. Signé : Alapetite.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Ministère de l'Intérieur, Commissariat spécial de police. Mulhouse (Haut-Rhin). Obus à gaz asphyxiant dans la forêt de la Hardt. Rapport. Mulhouse, le 8 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Chef d'Escadron Salvaire Commandant P.I. le Parc d'Artillerie à Monsieur le Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace, op. cit.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Article 2 de son contrat, modifié par le 7e avenant.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement militaire de Strasbourg. Commandement Supérieur du Territoire d'Alsace. Etat-Major. Le Général Humbert à Monsieur le Commissaire Général de la République. Destruction de munitions. Strasbourg, le 5 novembre 1920. Signé : Bourgine.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Service de l'Artillerie. Subdivision de Mulhouse. Le Lieutenant Cornevaux chargé des services de l'Artillerie à Monsieur le Général Commandant l'Artillerie du 7e C.A. Mulhouse, le 17 juin 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gendarmerie Nationale. Légion d'Alsace-Lorraine. Compagnie du Haut-Rhin. Rapport du Lieutenant Ducay, commandant la Gendarmerie de la Section sur l'explosion d'un projectile de guerre. Altkirch, le 31 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Lettre mémoire du 7 janvier 1922 de Mr le Maire d'Illkirch à Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin. Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. 21e Corps d'Armée. Commandant de l'Artillerie. Etat-Major. Le Général Marchal, Commandant l'Artillerie du 21e Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République. Strasbourg, le 5 mai 1922. Signé : De Pouydraguin.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Commissariat Général de la République. Le Commissaire Général de la République à Monsieur le Directeur des Voies Ferrées et Route. Maintien du dépôt de munitions. Strasbourg, le 20 mars 1922. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. J.N. Secrétariat Général. Monsieur le Conseiller Général. Monsieur Georges Weill, Conseiller Général du Bas-Rhin. 23 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gouvernement Militaire de Strasbourg. Parc d'Artillerie. Exécution des prescriptions de la note n°803 4/Al en date du 29 septembre 1921 du Commissaire Général de la République. Tableau indiquant au 1er avril 1921 l'état d'avancement de

la destruction des munitions sur le Territoire d'Alsace. Strasbourg, le 4 avril 1922. Le Chef d'Escadron Salvaire, commandant le Parc. Signé : Salvaire.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Gendarmerie Nationale. Légion d'Alsace-Lorraine. Compagnie du Haut-Rhin. Rapport du Lieutenant Ducay, commandant la Gendarmerie de la Section sur l'explosion d'un projectile de guerre. Altkirch, le 31 mai 1922.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Le Préfet du Département du Bas-Rhin à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des Affaires Militaires) à Strasbourg. Strasbourg le 22 juillet 1920. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Les dépôts de munitions allemands sur les Territoires d'Alsace et de Lorraine. 26 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du 31 mai 1921.

Archives Départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Directeur de la SLPI (Mr Soubielle) au Sous-Secrétaire à la Liquidation des Stocks du 22 mai 1921,

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Près d'un volcan ! Un camp de munitions « oublié » près de Sarre-Union menace l'existence de 25 000 personnes ! La Dépêche de Strasbourg. 6 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, cote 121 AL 402. *La République*. 29 avril 1921 n° 117 (germanophone) *Explosion im Munitionspark bei Saar-Union. Weihin vernehmbare Detonationen – Panik in Keskastel. Keine Menschenopfer*.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Rapport de l'Officier d'Administration Chef Artificier Michel du Parc d'Artillerie de la Place de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munition du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Commissaire Général de la République à Monsieur le Sous-Secrétaire d'Etat aux Finances (section artillerie). Strasbourg le 19 mai 1921, Strasbourg. Signé : Alapetite.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Explosion d'un dépôt de munitions à Pouilly. *Le Lorrain* du 30 juin 1921.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Colonel commandant 153e Régiment d'Artillerie au Général Commandant Supérieur du Territoire d'Alsace-Lorraine. Commissaire Général de la République à Strasbourg. Ministre de la Guerre n°21 – 5 juillet service récupération.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Metz, le 4 octobre 1921. Le Lieutenant-Colonel, commandant le PAR de Metz. Compte rendu mensuel au sujet de la destruction et de la Récupération de Munitions.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le Sous-Secrétariat d'Etat à la Liquidation des Stocks à Monsieur le Commissaire Général de la République (Direction des affaires militaires). Strasbourg, le 22 juin 1921. Signé : illisible.

Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Le lieutenant Cornevaux chargé des Services de l'Artillerie et contrôleur militaire de Clere & Schwander à Monsieur le Général commandant l'Artillerie du VIIe Corps d'Armée. 17 juin 1922.

Archives départementales du Cher,

Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28 - 29. Gendarmerie nationale. Compagnie du Cher, arrondissement de Bourges. Procès-Verbal constatant renseignements faisant suite au P.V. n°420 des brigades de Bourges du 19 mai 1929 sur la destruction d'explosifs à la Chapelle-Saint-Ursin (Cher). 22 mai 1929.

Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28 – 29. Service des Mines. Arrondissement Minéralogique de Clermont-Ferrand. Explosifs. Ateliers de destruction de fusées. Rapport. A Bourges, le 30 mai 1929.

Archives départementales de la Marne

Archives départementale de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213.VIe Corps d'Armée. Etat-Major. Le Général ~~Sarrail~~ Commandant la VIe Armée à Monsieur le Préfet de la Marne. Châlons-sur-Marne, le 19 septembre 1914.

Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 140 M 17, Lettre du Préfets au Ministère de l'Agriculture du 18 septembre 1917.

Archives départementales de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213, lettre du Sous-Préfet de l'arrondissement d'Epernay à Monsieur le Préfet de la Marne, Epernay le 25 octobre 1914.

Archives départementale de la Marne, site de Reims, cote 203 M 213. Courrier à l'attention de Monsieur le Préfet de la Marne du Général ~~Sarrail~~. Commandant le VIème ~~Corps de l'Armée~~ Région.

Archives départementales de la Marne, site de Châlons-en-Champagne, cote 7 P 472-1.

Archives départementales de la Meuse

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571.Courrier du Général Pistot, commandant la 6e Région militaire, au Préfet de la Meuse, 27 septembre 1914.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571, lettre du Général Joffre, commandant en Chef de l'Armée Française au général Pistot, commandant la 6e Région militaire, 25 septembre 1914.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571. Courrier du Général De Grandpray, directeur des Etapes et des Services de la Ier Armée au Préfet de la Meuse, 17 septembre 1914.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1251 W 571. Lettre de M. Fléaux, Maire de Julvécourt au Préfet de la Meuse du 27 septembre 1914.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note au sujet du dépôt de munitions de Spincourt. Ministère de la Guerre. Juillet 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Dépôts de munitions.

Archives départementale de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. 2e Corps d'Armée. Gendarmerie Nationale, 2e Légion, Compagnie des Ardennes, Arrondissement de Montmédy. Rapport du Lieutenant Mathis sur l'explosion d'un dépôt de munitions à Spincourt. A Montmédy le 20 mai 1919 [manuscrit]. Signé : Mathis.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note au sujet du dépôt de munitions de Spincourt.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Monsieur le Préfet de la Meuse à Monsieur le Général Commandant du 6e Corps d'Armée. Bar-le-Duc, le 27 mars 1920.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Réorganisation de la vie locale dans les Régions Libérées. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Général Commandant le 6e Corps. Bar-le-Duc, le 2 avril 1920.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Préfecture de la Meuse. Note à Monsieur Chastel, Secrétaire Général. Bar-le-Duc, le 2 avril 1920. Signé : le Secrétaire Général à la Reconstitution.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Rapport du lieutenant Mathis de la 2e compagnie de gendarmerie des Ardennes, arrondissement de Montmédy, daté du 20 mai 1919, communiqué au préfet de la Meuse le 23 mai 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Ministre des Régions Libérées, à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Bar-le-Duc, le 18 août 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre, Direction de l'Artillerie, Services Chimiques de Guerre. Le Président du Conseil, Ministre de la Guerre à M. le Préfet de la Meuse, Bar-le-Duc. Paris, le 28 août 1919. Signé : Maurin.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Ministre des Régions Libérées, à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. Bar-le-Duc, le 18 août 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Le Préfet de la Meuse à Monsieur le Président du Conseil, Ministre de la Guerre. 3e Bureau, Services chimiques de Guerre – IIe Section. Objet : dangers d'explosion de projectiles. Bar-le-Duc le 18 septembre 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Commandement départemental des PGRL de la Meuse. Note au sujet de dépôt de munitions de Spincourt. Vraisemblablement, le 7 septembre 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Note pour la destruction des projectiles. Ministère de la Guerre. Paris, le 27 mars 1919.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère des Régions Libérées. Département de la Meuse. Direction générale des services techniques de reconstitution. Note n° 2570 à Monsieur le Préfet de la Meuse. Bar-le-Duc, le 5 mai 1920.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 1184 W 696. Courrier du 16 juillet 1920 du conservateur des Eaux & Forêts à la Direction générale des Eaux & Forêts.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Direction des Services Chimiques de Guerre. Note pour la Destruction de Projectiles à Ypérite Fuyard. Paris, le 27 mars 1919. Signé : le Général, Directeur des Services Chimiques de Guerre. Ozie.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. *L'Éclair de l'Est « Spincourt sur un volcan ».*

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. République Française. Préfecture du département de la Meuse. Etablissements Dangereux, Insalubres ou Incommodes (1er Classe). Etablissement d'une usine pour le Démontage d'Obus explosifs et toxiques à Muzeray. Enquête de Commodo et Incommodo. Signé : le Préfet de la Meuse. P. Emery. Bar-le-Duc, le 30 avril 1920.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Rapports d'exécution des prescriptions de la lettre préfectorale n°21.767 du 12 octobre 1925. VIe Corps d'armée. Place de Verdun.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Monsieur Sébastien Guillaume à Monsieur le Préfet de la Meuse. Bréhéville, le 21 avril 1933.

Archives départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Désobusage — Champs d'explosions de Vaudoncourt – Spincourt - Muzeray — Dépôt de la Gélinerie.

Archives Départementales de la Meuse, site de Bar-le-Duc, cote 10 R 82. Ministère de la Guerre. Artillerie. Instruction provisoire concernant le stockage, le triage et la destruction des munitions dans les régions frontières. Annexe 3. 7 juillet 1919.

Archives départementales de l'Oise

Archives départementales de l'Oise, site de Beauvais, cote KZ 1540. Comité départemental pour l'examen des questions relatives à la reconstitution des régions libérées, séance du 9 novembre 1918, rapport du préfet de l'Oise.

Archives départementales de l'Oise. Bonnard, J.Y. Ricard, B. 1914-1918. L'Oise dans la Grande Guerre. Actes du colloque organisé par le Conseil général de l'Oise et la Ville de Noyon, Noyon, 24-25 octobre 2008.

Archives Départementales de l'Oise, site de Beauvais, cote MP 1583. Préfecture de l'Oise. Police des RBC. Secteur de Compiègne. Le Brigadier Wautrin. Commandant la Brigade de police des RDG de Ressons-sur-Matz à Monsieur me Commissaire Spécial, Chef de Secteur au Palais de Compiègne. Au sujet de l'explosion d'un dépôt de munitions à la côte 115, territoire de la commune de Ressons-sur-Matz. Ressons-sur-Matz, le 12 juillet 1921. Signé : Wautrin.

Archives Départementales de l'Oise, site de Beauvais, cote MP111. Le Capitaine Eveloy, Chef du Service du Contrôle du désobusage, 2 rue Lescouvé à Amiens à Monsieur le Préfet de l'Oise à Beauvais. Dépôt de Bailleul s/Therain. Amiens, le 23 octobre 1930.

Archives départementales du Pas-de-Calais

Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras, cote 1 W 1653. Correspondances.

Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Kreiskommendatur Arras. Sprengplatz in Fampoux. Arras, 22.09.1941. Signé : Major und Kommandant. Illisible.

Archives départementales du Pas-de-Calais, site d'Arras. Reconstitution des Région Libérées du Pas-de-Calais. Situation au 1er janvier 1927. Septembre 1927. Imprimerie Th. et A , Plouvier et C. Chartreux. Hénin - Liétard et Carvin. p. 479.

Archives étrangères

Centre de documentation historique des forces armées. Musée de l'Armée, site de Evere, Bruxelles, Belgique

Musée de l'Armée, site de Evere, Bruxelles, Belgique. Courrier du 29 mai 1922.

Musée de l'Armée, site de Evere, Bruxelles, Belgique. Le Ministre de la Défense Nationale à Messieurs les Bourgmestres et Echevins de la commune de Wytschaete.

Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Bruxelles, Belgique. Le Ministre de la Défense Nationale à Monsieur le Ministre de l'Intérieur. Bruxelles, le 25 septembre 1922.

Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Royaume de Belgique. Commission Centrale de la Récupération. Le Lieutenant-Général Président de la CRR, Bruxelles au Ministre de la Défense Nationale. Bruxelles le 28 juillet 1921. Signé : Le Lieutenant – Général Président (en mission) (manuscrit) Kysen.

Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Le Lieutenant-Colonel, commandant le Corps de Discipline au Ministre de la Défense Nationale, Cabinet. Bruxelles, le 30 juillet 1921. Signé : illisible.

Centre de documentation historique des forces armées, site d'Evere, Belgique. Commission Centrale de la Récupération. Le Lieutenant – Général, Président de la CRR à Monsieur le Ministre de la Défense Nationale, Cabinet. Bruxelles, le 21 septembre 1922. Signé. Tollen. Rapport relatif au Service des munitions en date du 15 septembre 1922. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération. Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de Récupération, Contrat entre l'Etat Belge et la firme Pickett (F. N. Pickett et Fils à Wimereux, France). Bruxelles, 24 avril 1921. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, au Ministre de la Défense Nationale, Bruxelles, 15 septembre 1922, document no. 52705/A/2950, Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Institut d'Hygiène de Biologie et Chimie de l'Armée. Document no. C/28, Bruxelles, 3 mars 1922. Rapport par Paul Erculisse, Pharmacien de 1re Classe, Chef du Laboratoire de Chimie Toxicologique, Dr Sillevants, Médecin de Régiment, Chef du Laboratoire de Physiologie Toxicologique et le Capitaine-Commandant Van den Berghe. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.Centre de Documentation Historique, Evere. Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, au Ministre de la Défense Nationale (note 29). In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Lettre de Pickett metal au Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR, Londres, 14 septembre 1922. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de documentation historique des forces armées. Belgique. Document n° 49386/A/2950, Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Lettre du Lieutenant-Général Tollen, Président de la CCR au Ministre de la Défense Nationale. Bruxelles, 23 février 1922. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

Centre de Documentation Historique, Evere. Institut d'Hygiène de Biologie et Chimie de l'Armée. Dossier MDN, Cabinet, Commission Centrale de la Récupération. Rapport par Paul Erculisse, Pharmacien de 1er Classe, Chef du Laboratoire de Chimie Toxicologique, Dr Sillevants, Médecin de Régiment, Chef du Laboratoire de Physiologie Toxicologique et le Capitaine-Commandant Van den Berghe. Document no. C/28, Bruxelles, 3 mars 1922. In Zanders, J. P. (1997), *The destruction of old chemical munitions in Belgium*.

***National Archives*, Washington D.C (USA)**

National Archives, Washinghton D.C. number RG-306-NT, Box 367. « *Rush* » photographique d'un article du journal The New York Times paru le dimanche 3 mai 1936 sous le titre *Echoes of the World War in the « Red zone » of France*.

National Archives, Washington D.C., cote RG120 NM-91-915 B93-94. From Division Gas Officer to Chief of Chemical Warfare Service. Artillery Gas Attacks – American Army.February 5, 1919.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Records of the Ammunition Supply Board. 1918-19. NM-91-1937, B2. Instruction for safeguarding and handling of ammunition in the field. Issued by Ordance Department. AEF. March – 1918.

National Archives. Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1-71.1 AEF. Memorandum for General Wheeler. Salvage of ammunition in the Army area. June 19, 1918.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Records of the Ammunition Supply Board. 1918-19. NM-91-1937, B2. Instruction for safeguarding and handling of ammunition in the field. Issued by Ordance Department. AEF. March – 1918.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1-71.1 AEF. Ammunition supply section. Memorandum for General Rice. July 24, 1918.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Instruction for Salvage Squads working on artillery ammunition.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Salvage Squads Instruction.

National Archives Washington D.C., number RG-120 NM-91, Box n°1653. Headquarter First Army AEF, sept 23th, 1918.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Unexploded Shell, Bombs, and Grenades – Methods of Destruction.

National Archives, Washington D.C., number RG-120 221 – 471.6, Box n°11. Chief Ordnance Officer, september 6th, 1918 to salvage Officer, Paris.

National Archives, Washington D.C., number 1917-1919. 71.2-77, B7. Instruction for check, storage and handling of gas warfare material. June 15, 1918.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Ammunition section. Correspondence.

National Archives, Washington DC, cote RG120 NM-91-915 B93-94. From Division Gas Officer to Chief of Chemical Warfare Service. Artillery Gas Attacks – American Army.February 5, 1919.

National Archives, Washington D.C. Statement of type, quantities and weights of ammunition and square footage required therefore and avalaibilities. Number RG-120 221-471.6 Box n°11

National Archives, Washington D.C, number RG 120, NM-92-2010, Box n°5. Ordnance field headquarter, SOS, AEF. Souilly, December 14, 1918. Processing of board of Officers convened by O. O. 341, GHQ. p. 3.

National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-92-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer, Jean-les-Buzy to Chief Ordnance Officer AEF, Tours.

National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-92-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer AEF, Souilly, to Chief Ordnance Officer AEF, december 10th, 1918. Signé : H.H. Stout, Lt. Col. Ord.

National Archives, Washington D.C., number RG 120, NM-91-1286, Box n° 1654. Headquarter Third Army AEF, may 16th, 1919. From Chief of Staff, Third Army to Chief Officer Salvage Unit # 301 « Disposition of property ». Signé : Malin Graig.

National Archives, Washington D.C., number RG 120. Ordnance Department Supply Division. Ammunition section. Correspondences 1917-1919. 61.1 – 71.1. Report of method of demolishing salvage German ammunition.

National Archives Washington D.C., number RG-120 NM-91 Box n°1653. Captain QMC Chief Salvage Officer, 2nd Army. Signé: Max H. Neuman.

National Archives, Washington D.C., number RG-120 (AEF). Ordnance Department Supply Division. Ammunition Section. Correspondence. 1917-1919. Box n°2

National Archives Washington D.C., number RG-120, NM-91-2010, Box 5. Ammunition Park Sector First Arm, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120, NM-92-2010, box 5. Inventor Ammunition Depot 361 Mülheim, Germany, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. American Expeditionnary Forces – Headquarter Third Army – Office of Chief Ordnance Officer (02/05/1919)., In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives, Washington D.C., number RG-120 NM-91-2010, Box n°4. Chief Ammunition Officer, Jean-les-Buzy to Chief Ordnance Officer AEF, Tours.

National Archives, Washington D.C., RG-120. Chief Ammunition Officer AEF, Souilly, to Chief Ordnance Officer AEF, december 10th, 1918. Signé : H.H. Stout, Lt. Col. Ord.

National Archives, Washington D.C., RG-120 NM-91-1286, Box n° 1654. Headquarter Third Army AEF, may 16th, 1919. From Chief of Staff, Third Army to Chief Officer Salvage Unit # 301 « Disposition of property ». Signé : Malin Graig.

National Archives Washington D.C., number RG-120. Der Regierungspräsident in Trier (30/12/1918). Schreiben an Brigade-general Smith in Trier wegen der Beseitigung von Fundmunition im Landkreis Trier, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Company « B » - 314th Ammunition Train AEF (24/01/1918), In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. G-4. US-Armee (04/04/1919), In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Assistant Chief of Staff (G-4) – 3. US-Army (12/05/1919), In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarter Ordnance Detachment Hallschlag Ammunition Plant (21/07/1919), In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. American Expeditionary Forces – Headquarter Third Army - Office of Chief Ordnance Officer (10/06/1919), In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Mülheim Ammunition Depot, Mülheim bei Koblenz (02/01/ 1920) Report of Activities, Month of December 1919, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Espargit Eifeler Sprengstoffwerke und chemische Fabriken AG. (24/01/1920). Abschrift eines Schreibens der Polizeidienststelle in Stadtkyll betreffend das Ausbrennen von Granaten, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), op. cit.

National Archives Washington DC, number RG-120. Headquarter Ordnance Detachment Hallschlag Ammunition Plant (23/08/1919)., In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (03/06 et 08/06/1920). Schreiben an Dr. Ahrens über die Beendigung des Vertrages zur ernichtung von Munitionen, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (30/06/1920). Report of activities of Ordnance Services, AFG from 02/07/1919 to 30/06/1920, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office Chief Ordnance Officer) (27/07/1920). Schreiben an Captain Hendrickx bei der französische Mission in Koblenz wegen der geplanten Munitionsvernichtung in Hallschlag, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Mülheim Ammunition Depot, Mülheim bei Koblenz (28/02/1921). Activity Report, Month February 1921, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives Washington D.C., number RG-120. Headquarters – American Forces in Germany (Office of the Ordnance Officer) (15/09/1921). Schreiben an einen Offizier der 60. Ordnance Company betreffend die Anweisungen zur Erfüllung der Verträge mit Dr Ahrens und des Süddeutschen Diskonto, In Preuss, J., Eiteberg, F. (1999).

National Archives, Washington D.C., number H-1485. Odnance salvage activities in the Meuse-Argonne sector.

***National Archives*, Kew Gardens, London (Grande-Bretagne)**

National Archives, Kew Gardens, London, number WO 158/151.Hudspeth, H. (1971), Information manuscrite. Maj. Henry Hudspeth R.E. 171th TC from 22/09/17 to the Controller of Mines 5th Army.

National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair Vol. 26 n°329. September, 1921. *F.N. Pickett & Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN04 7012. Conteville ammunition contract.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7006. Buried ammunition at Audruicq and Abancourt depots, France. 23th november, 1921.

National Archive, Kew Gardens, London, number WO 158/151.Hudspeth, H. (1971), Information manuscrite. Maj. Henry Hudspeth R.E. 171th TC from 22/09/17 to the Controller of Mines 5th Army.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 7010. Paul Cambon au Comte Curzon de Kedleston. 29th September 1920.

National Archives, Kew Gardens, London, number TS 36/227. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, 1 place St. Thomas d'Aquin. Paris, 31st March 1924.

National Archives. Kew Gardens, London, number MUN 5 /188. Courrier du 23 septembre 1919.

National Archives. Kew Gardens, London, number MUN4 / 7010. Translation of Minute of Proceedings of the Commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to dump in the sea from the Port of Dunkerque gas shells and other ammunition.

National Archives. Kew Gardens, London, number MUN4 / 7010. Ministry of War. Department of Artillery. Translation. French Republic. Paris, the 28th October 1921. Signé : for the Minister & by his Order. The Director-General of Artillery.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 7010. Attached to the record of the procedings of the commission assembled at Dunkerque. 1st June 1921.

National Archives. Kew Gardens, London, number MUN 5/188. C.C. 195. Co-Ordinating Comittee. Breaking down Ammunition in France. Signé : (Sgd.) E. C. Given. Director Gebral of Factories. 23rd September, 1919. Room 4058, Armament, Blgds.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Titre d'un article paru dans la presse britannique au sujet de l'entreprise de F.N. Pickett & Fils. Date de parution et périodique inconnus.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7006. Memorandum RE F.N. Pickett et Fils contract with the british government for the breaking down of ammunition in France.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7012. Bourbourg Progress –Contd-

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7011. F.N. Pickett et Fils. Boulogne-sur-Mer, 22nd December 1926. Col. H.C. Cole, Chief Land Agent & Valuer. War Office. Room 470. London. Signé : Darragh, General Manager.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Boulogne 5 000 tons of shells containing Mustard & Yellow Cross gas. Signed. V. Cotoni, Capitaine de vaisseau, President of the Commission. Boulogne, May 30th 1921.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the Commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Dunkerque gas shells and other ammunition. Meeting on the 1st june, 1921 at Dunkerque.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Translation of minutes of proceedings of the commission appointed to examine the request of Messrs. Pickett & Son to « dump » in the sea from the port of Boulogne 5 000 tons of shells containing Mustard & Yellow Cross gas. Signed. V. Cotoni, Capitaine de vaisseau, President of the Commission. Boulogne, May 30th 1921.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7006. F. N. Pickett & Son. Report. Upon the financial position & the financial results of Contracts for the breaking down of Ammunition in France and England to 27th September 1922 and later. Price, Waterhouse & Co. London.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Administrator Disposal Board (French Section) to Pickett et Fils, 5th November 1921.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN4 7010. Pickett et Fils to Administrator Disposal Board (French Section), 10th November 1921, 1–2.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Notes on the subject of Breaking Down of Shells and Burning of Explosives. Secretary Technical Gas Committee. Signed : R.L. Corbett. 17th May 1923.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Copy of leter from Mrs. Cole of Sherfield Hallm Basingstoke date May 2nd to Mr. Ernest Crawley. National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of the 15th Meeting of the Technical Gas Commitee held at RAOD (Royal Army Ordnance Depot) Depot Bramley, and CSD Depot 128 at Farlington, on Tuesday the 15th May 1923. Signed : Secretar Technical Gas Committee.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN 4 / 6237. Minute of a meeting held in Room 2, Block B, Earls Court, 4th May, 1923. Signed : Captain G. Eades.

National Archives, Kew Gardens, London, number MUN04 7010. Article de presse britannique, non nommé, non datée.

National Archives, Kew Gardens, London, number TS 36/227. Translation. Ministère de la Guerre. Inspection Générale des Munitions, 1 place St. Thomas d'Aquin. Paris, 31st March 1924.

National Archives, Kew Gardens, London, number WO 142/243, Hartley, H. (oJ). Report on german chemical warfare organisation and policy, 1914-1918, In Bausinger, T. (2011).

Autres

Archives de la Défense. Porte, Lieutenant-Colonel (2016), *Les offensives de 1915.* Nécessité stratégique ou doctrine irresponsable ?

Ministère de la Défense, Bulletin officiel des armées, Direction de l'administration générale. *Traités et accords liant la France. : convention IV concernant les lois et coutumes de la guerre sur terre, signée à La Haye le 18 octobre 1907.* Imprimerie nationale, 1988, sect. II. Des moyens de nuire à l'ennemi : des sièges et des bombardements, ant. 23a.

Archives de la Préfecture de Police de Paris, cote B/A 1535. Note du 4 mai 1915.

Archives départementales du Cher, site de Bourges, cote 8 S 28-29. Procès-verbal constatant des renseignements au sujet de la destruction d'explosifs sur le territoire de la commune de la Chapelle Saint-Ursin par deux sociétés. Gendarmerie nationale, 5e Légion, Compagnie du Cher, 19 mai 1929.

Archives municipales de Grenoble. Courrier de Monsieur le Maire de la Ville de Grenoble à Monsieur le Préfet de l'Isère du 19 juillet 1918. Objet : guerre. Les explosions des 29 et 30 juin.

Parc d'Artillerie de Poitiers. Rapport de l'officier d'administration Klauss, Chef du Service des Munitions du PAR de Poitiers sur les grenades immergées dans l'ancienne carrière La Désirée située à Avrillé, Maine et Loire. Poitiers le 20 mars 1924. Signé : Klauss. Communication personnelle (les cotes n'ont pas été transmises).

UK Parliament. British Army. Volume 152: debated on Tuesday 4 April 1922. Sir L. Worthington-Evans.

UK Parliament. Surplus Ammunition (Breaking-Up). Volume 152: debated on Thursday 6 April 1922. Sir L. Worthington-Evans.

War Department. Army War College. Historical Section. World War I Branch. ca. 1918-ca. 1948, number 11-SC-38546 - NARA - 55236251-cropped.

Archives Municipales de Muzeray. Mairie de Muzeray. Séance extraordinaire du 2 juin 1920. Protestation contre l'établissement d'une usine à Muzeray pour le démontage des obus toxiques et explosifs.

Archives départementales du Haut-Rhin, site de Colmar, cote 3 AL 2 – 399. Lettre du 19 avril 1926.

Documents numérisés à la Bibliothèque nationale de France (BnF)

Presse

Bibliothèque nationale de France. *L'Ouest-Eclair,* n°4529, 26 septembre 1911.

Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité*. 6 mai 1932. « *Alerte aux gaz ! l'Ypérite* »

Bibliothèque nationale de France. *L'Eclair de l'est*, 9 septembre 1919

Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. (1921), *Le Désarmement du sol. Le Figaro*, samedi 31 mai 1921.

Bibliothèque nationale de France. Rio, A. (1920), *Lectures pour tous : revue universelle et populaire illustrée*. Juin 1920. p. 1257 – 1264. *Le Nord ressuscité*.

Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des régions dévastées. Pour la défense des sinistrés du Nord et de l'Est du 24 août 1919. Lettre ouverte à Monsieur le Ministre des Régions libérées*. Signé : STPU.

Bibliothèque nationale de France. *La Défense Agricole*. Les régions libérées, 29 août 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Éclair de l'Est*, 9 septembre 1919.

Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des transports : revue internationale des chemins de fer et de la navigation. 1878-1939*, N° 37, 18 octobre 1919.

Bibliothèque nationale de France. *L'Eclair de l'est*, 9 septembre 1919

Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 14 avril 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 30 et 31 octobre 1920.

Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 12 décembre 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant*, 22 octobre 1919.

Bibliothèque nationale de France *L'Intransigeant,* 23 octobre 1919.

Bibliothèque nationale de France *L'Intransigeant*, 7 janvier 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant,* 3 mars 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Intransigeant,* 24 juin 1920,

Bibliothèque nationale de France. L'Intransigeant, 5 juillet 1920.

Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Le Figaro*, *Le Désarmement du sol,* samedi 31 mai 1921.

Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité. On a trouvé dans l'arsenal d'Annet divers modèles de bombes allemandes.* (Lucien Sampaix), 23 février 1938.

Bibliothèque nationale de France. *Le Figaro*, 4 mars 1938.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de la Manche et de la Basse-Normandie*, 4 janvier 1919

Bibliothèque nationale de France. *Le Nouvelliste d'Alsace*, 10 octobre 1923.

Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 14 avril 1920.

Bibliothèque nationale de France. *L'Alsace,* 30 et 31 octobre 1920.

Bibliothèque nationale de France. *Journal des débats politiques et littéraires*. 19 juillet 1920.

Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Le Journal des débats politiques et littéraires*, 09 novembre 1928.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Cherbourg*, 26 novembre 1923.

Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 28 mai 1923

Bibliothèque nationale de France. *Le Populaire*, 26 juillet 1923.

Bibliothèque nationale de France. *L'Humanité*, 06 mai 1932.

Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies*, 23 novembre1919

Bibliothèque nationale de France. *Bulletin des Réfugiés du département du Nord*, 10 décembre 1919.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies*, 3 juin 1923

Bibliothèque nationale de France. *L'Écho : grand quotidien d'information du Centre Ouest*. 11 juin 1921.

Bibliothèque nationale de France. *L'Express du Midi : journal quotidien de Toulouse et du Sud-Ouest* ["puis" organe quotidien de défense sociale et religieuse "puis" organe régional de redressement national, de défense religieuse et de progrès social]. 10 juin 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Journal officiel de la République française. Débats parlementaires. Sénat : compte rendu in-extenso*. 09 juin 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies*, 17 mai 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies*, 27 novembre 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Figaro : journal non politique*. 30 mai 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies*, 3 juin 1923.

Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 20 octobre 1923.

Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 17 janvier 1925.

Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 18 juillet 1925.

Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain*, 12 Septembre 1926

Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain*, 10 novembre 1926

Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain*,14 août 1927.

Bibliothèque nationale de France. *L'Est Républicain*,11 septembre 1927.

Bibliothèque nationale de France, *La Lanterne*, 11 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France, *Le Matin - derniers télégrammes de la nuit* – du 21 avril 1922 (Numéro 13911).

Bibliothèque nationale de France. *Le Petit Parisien* (Paris). 10 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France. *Le Matin* (Paris. 1884). 21 avril 1922.

Bibliothèque nationale de France, *Le Matin - derniers télégrammes de la nuit*-du 21 avril 1922 (Numéro 13911).

Bibliothèque nationale de France, *Le Petit Parisien : journal quotidien du soir*, du 10 mars 1922 (Numéro 16446).

Bibliothèque nationale de France, *Le Blessé* du 1er novembre 1922.

Bibliothèque nationale de France. Soulaine, P. *Un intéressant procès en Angleterre. Le Figaro*, lundi 22 avril 1929.

Bibliothèque nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 5 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France. *Le Journal*, 22 août 1929

Bibliothèque Nationale de France. *Le Bulletin meusien*, 14 mai 1921

Revues, rapports

Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 1er et 2e Bureau. Artillerie Allemande. *Les fusées*. Paris. Imprimerie Nationale. 1918.

Bibliothèque nationale de France. *Matignon, C. (1917), L'industrie de l'iode, son histoire, son état actuel. Revue des Sciences pures et appliquées*. Tome vingt-huitième.

Bibliothèque nationale de France. Henry De Varigny. Explosions et explosifs. Pages d'histoire – 1914-1916. Souscription du Ministère de l'Instruction publique et du Gouvernement belge. 11e série. Librairie Militaire Berger-Levrault. 1916.

Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Etat-Major – 1er et 2e Bureaux. Artillerie allemande. *Les fusées*. Paris, Imprimerie nationale. 1918..

Bibliothèque nationale de France. Gautier, Léopold (professeur de sciences physiques au collège de Melle, Deux-Sèvres, Dr). Wagner et L. Gautier (1878), *Nouveau traité de chimie industrielle à l'usage des chimistes*... Deuxième édition française. 1878.

Bibliothèque nationale de France. Maurice Zimmermann. *Annales de géographie, année 1917, volume 26, numéro 141*, p. 237-238.

Bibliothèque nationale de France. Cité dans *Journal d'agriculture pratique, de jardinage et d'économie domestique. Nocuité du nitrate perchloraté*. 04/01/1900 – 28/06/1900. pp. 468 – 470.

Bibliothèque nationale de France. Matignon, C. (1917), *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées. Première partie. Revue des Sciences pures et appliquées. Tome vingt-huitième*. Octave Doin et Fils, Editeurs. Paris.

Bibliothèque Nationale de France. Matignon, C. *L'effort allemand dans le domaine des matières azotées. Première partie. Revue des Sciences pures et appliquées. Tome vingt-huitième. 1917*. Octave Doin et Fils, Editeurs. Paris.

Bibliothèque nationale de France. *Mémorial des Poudres et Salpêtres*. Biffe, 1882

Bibliothèque nationale de France. Société académique de l'Aube. *Mémoire de la Société d'agriculture, sciences et arts du département de l'Aube. M. Bonnefoi. Note sur la fixation de l'azote atmosphérique*. Non daté. Vers 1910.

Bibliothèque nationale de France. Grand quartier général des armées du nord et du nord-est. *Bulletin de renseignements du génie / Grand quartier général des armées du Nord et du Nord-Est, Inspection générale des travaux et organisations aux armées. Les explosifs de l'ennemi*. Septembre 1918. pp. 14-27

Bibliothèque nationale de France. Rapporté par le Capitaine Culmann. *Chose d'Allemagne*, Paris, Lavauzelle, probablement 1910.

Bibliothèque nationale de France. Général Baquet du Cadre de Réserve. *Souvenirs d'un Directeur de l'Artillerie. Les Canons – Les Munitions*. Novembre 1914 – mai 1915. Paris. Henri Charles – Lavauzelle. Editeur militaire. 1921.

Bibliothèque nationale de France. *Cours d'infanterie de l'Ecole supérieure de guerre (1913).*

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre.* Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, état-major de l'armée, service historique. 1930. GQG DA. Télégramme au Ministre de la Guerre, 2887, 18 heures, 9 septembre 1914.

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, état-major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Note pour les armées, 5205, 14 septembre 1914. Annexe 7.

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, état-major de l'armée, service historique. 1930. VIe Armée. Télégramme au général commandant en chef, 9910, 12h25, 19 septembre 1914. Annexe 16.

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre.* Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, état-major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Télégramme à général commandant la 6e armée, 6213, 19 septembre 1914. Annexe 13.

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande guerre*. Tome deuxième. 2 / Ministère de la guerre, état-major de l'armée, service historique. 1930. GQG. Télégramme aux généraux commandant les armées, 6999, 24 septembre 1914. Annexe 29.

Bibliothèque nationale de France. *Journal officiel de la République française. Débats parlementaires*. Sénat : compte rendu in-extenso. 09 juin 1921.

Bibliothèque Nationale de France. *Bulletin des armées, récit du 26 mars. La Grande guerre du XXe siècle. 1917/02.*

Bibliothèque nationale de France. Chef d'escadron Champon, *Le ravitaillement en munitions*, Metz, Centre d'études tactiques d'artillerie, mars 1920.

Bibliothèque nationale de France. Rapporté par le Capitaine F. Culmann, *Choses d'Allemagne*, Paris, Lavauzelle, vers 1910.

Bibliothèque nationale de France. Véziat., E. (2001), *La reconstruction dans le département de l'Aisne après la Grande Guerre. Société Historique de Haute-Picardie. Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie de l'Aisne. Mémoires*.

Bibliothèque nationale de France. *Les armées françaises dans la Grande Guerre. Tome deuxième. 2* / Ministère de la Guerre, état-major de l'armée, service Historique. 1930. Ve Armée. Lettre au commandant général en chef, 1204-20 septembre 1914.

Bibliothèque nationale de France. Truffaut, G. (1918), *L'agriculture & la guerre. La Gloire de la France*. Emile Paul, Libraire.

Bibliothèque nationale de France. *Bulletin annoté des lois et décrets*. 1er janvier 1917.

Bibliothèque nationale de France. *Verdun-Argonne (1914-1918),* 1936.

Bibliothèque nationale de France. France. Sénat (1875-1942). Auteur du texte. Impressions : projets, propositions, rapports... / Sénat. 14 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France. Ministère des Travaux Publics. Service des Régions Libérées. *La reconstitution de la France dévastée: statistiques générales* (Paris, 1929).

Bibliothèque nationale de France. Pas-de-Calais. *Rapports et délibérations. Conseil Général. 1922. Quatrième partie. Liquidation des Stocks*. p. 344.

Bibliothèque nationale de France. *Décret du 18 novembre 1882 et l'instruction du 31 juillet 1889 relatifs aux adjudications publiques et aux marchés passés au nom de l'Etat*. Fait à Paris, le 18 novembre 1882. Signé : Jules Grévy. Par le Président de la République. Le Ministre des Finances, Signé : P. Tirard.

Bibliothèque nationale de France. Nast, M. (1920). Professeur à la Faculté de Droit de l'Université de Strasbourg. Auteur du texte. *Le Malaise Alsacien-Lorrain*. Paris Éditions G. Grès et Cie. Bibliothèque nationale de France.

Bibliothèque nationale de France. Fédération des sociétés d'histoire et d'archéologie de l'Aisne. *Mémoires*. 2001.

Bibliothèque nationale de France. *Les explosifs de l'ennemi*.

Bibliothèque nationale de France. *Revue du génie militaire.* 1929/07-1929/12.

Sources iconographiques

Archives départementales de l'Aisne

Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote FRAD002 2 Fi NEUVILLE-SOUS-MARGIVAL 3.
Archives départementales de l'Aisne, site de Laon, cote FRAD002 2 Fi CHAVIGNON 4.

Archives départementales du Bas-Rhin
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Courrier du Général Marchal, commandant l'artillerie du XXIe Corps d'Armée à Monsieur le Commissaire Général de la République du 5 mai 1922.
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Rapport de l'Officier d'Administration, Chef artificier Michel du Parc d'Artillerie Régional de Metz au sujet de l'incendie au dépôt de munitions du Bois de Lorraine le 28 avril 1921.
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Parc d'artillerie régional de Metz. Le Lieutenant-Colonel Chardon. Commandant le Parc d'Artillerie Régional de Metz à Monsieur le Commissaire Général de la République (cabinet Alexandre Millerand) à Strasbourg. 8 avril 1922.
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. Affiche bilingue pour la prévention des risques liés aux engins de guerre ancien abandonnés sur les lieux de tourisme mémoriel en Haute-Alsace. Commissariat Général de la République, Strasbourg, le 15 avril 1921.
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 408. L'accident de l'Hartmannsweiler. Coupure de presse annotée par le Haut-Commissaire de la République, Alexandre Millerand. Non daté.
Archives départementales du Bas-Rhin, site de Strasbourg, cote 121 AL 402. Coupures de presse au sujet de l'explosion du 28 avril 1921.

Archives municipales de Nancy

Archives municipales de Nancy, cotes FRAC54395_106_Fi_1528.

Archives municipales de Nancy, cotes FRAC54395_8_Fi_254.

Archives municipales de Nancy, cotes FRAC54395_106_Fi_1530.

Archives municipales de Nancy, cotes FRAC54395_8_Fi_255.

Archives municipales de Nancy, cote FRAC54395_107_Fi_11.

Archives municipales de Nancy, cote FRAC54395_8_Fi_259.

Bibliothèque et Archives Canada

Bibliothèque et Archives Canada, cote MIKAN 3628742

Bibliothèque et Archives Canada. General Currie, Commander of the Canadian troops in France, and A.D.C. Juin 1917.

Bibliothèque et Archives Canada. Vimy Ridge.

Bibliothèque et Archives Canada, cote MIKAN 3522015.

Bundesarchiv

Bundesarchiv, Allemagne, Bild 146-1971-045-48. 1er novembre 1917.

National Archives, Kew Gardens, London

National Archives, Kew Gardens, London, number WO 208 / 2248,

National Archives, Kew Gardens, London. Mayfair Vol. 26 n°329. September, 1921. *F.N. Pickett & Fils. Démonteur de Munitions Toxiques et Explosives*.

National Archives, Washington D. C.

National Archives, Washinghton D.C. number RG-306-NT, Box 367. « *Rush* » photographique d'un article du journal The New York Times paru le dimanche 3 mai 1936 sous le titre *Echoes of the World War in the « Red zone » of France*.

National Archives, https://catalog.archives.gov/id/24986. Ordnance Salvage activities in Meuse – Argonne sector [1918-1919]. Dickinson College Archives and Special Collections. From the Catalogue of official AEF photographs.

Service Historique de la Défense

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Le Chef de bataillon Frossard. Commandant le Génie de la XXVe Division à Monsieur le Général Commandant la 25e Division. Compte rendu. Le Ier octobre 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote 16 N 898. Capitaine Billard. Effets du tir de l'artillerie sur les organisations défensives. Janvier 1917.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 W 50. Ecole Centrale de Pyrotechnie Militaire. Rapport sur les dispositions prises pour la destruction des obus de 270 de 3 calibres, restés dans l'enceinte de l'Ecole après l'explosion du 10 octobre 1890. 21 novembre 1890.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 17 N 392. Rapport du Ministère de l'armement et des fabrications de guerre. Renseignements consécutifs à une mission aux armées britanniques. 10 août 1917,

Service historique de la Défense, site de Vincennes, cote GR 2 V 218. Canevas de tir.

Service Historique de la Défense, site de Vincennes, Archives du Génie, cote GR 2V218. XIIIe Corps d'Armée, Etat-Major. La guerre de mines en Argonne. Janvier 1918.

Bibliothèque nationale de France (BnF)

Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général des Armées du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 1er et 2e Bureau. *Artillerie Allemande*. *Les fusées*. Paris. Imprimerie Nationale. 1918.

Bibliothèque nationale de France. Truffaut, G. (1918), *L'agriculture & la guerre. La Gloire de la France*

Bibliothèque nationale de France. Rio, A. (1920), *Lectures pour tous : revue universelle et populaire illustrée.* Juin 1920. p. 1257 – 1264. Le Nord ressuscité.

Bibliothèque nationale de France. France. Sénat (1875-1942). Auteur du texte. Impressions : projets, propositions, rapports... / Sénat. 14 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France. *Turpin et l'obus torpille.*

Bibliothèque nationale de France. *French politician Charles Humbert (1866-1927).* Agence de presse Meurisse.

Bibliothèque nationale de France. *Verdun-Argonne* (1914-1918), 1936.

Bibliothèque nationale de France. C*arte spéciale des régions dévastées 36 NO Metz [nord-ouest].* Service géographique de l'armée. 1920.

Bibliothèque nationale de France. *Le Nouvelliste d'Alsace*, 10 octobre 1923.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de la Manche et de la Basse-Normandie*. 4 janvier 1919.

Bibliothèque nationale de France. Agence de presse Mondial Photo-Presse. *Georges Weil [sic], député du Bas-Rhin* : photographie de presse

Bibliothèque nationale de France. *Le Temps*, 28 mai 1923

Bibliothèque nationale de France. *Capt. Worsley [à d., commandant de l'expédition polaire Algarsson] et M. Pickett [tenant un chien en laisse] (CNews)* : [photographie de presse] / [Agence Rol] Agence Rol. Agence photographique (commanditaire).

Bibliothèque nationale de France. *M. Kostevitch sous l'uniforme de l'armée impériale russe.*

Bibliothèque nationale de France, *Le Petit Parisien* (Paris), 10 mars 1922.

Bibliothèque nationale de France, *Le Matin* (Paris. 1884), 21 avril 1922, suppléments.

Bibliothèque nationale de France. *Journal de Fourmies,* 27 novembre 1921.

Bibliothèque nationale de France. Grand Quartier Général du Nord et du Nord-Est. Etat-Major. 2e Bureau et Artillerie. *Artillerie Allemande. Les projectiles*. Paris. 1917.

Bibliothèque nationale de France. BnF Data. *André Kling*. https://data.bnf.fr/fr/12916400/andre_kling/

La Contemporaine

La Contemporaine, L'Argonnaute, fond Valois, référence BDIC VAL 068/028.

La Contemporaine, L'Argonnaute, fond Valois, référence BDIC VAL 068/029.

La Contemporaine, L'Argonnaute, référence B4352.

La Contemporaine. L'Argonnaute, Fond Valois, 30 janvier 1916, référence VAL 531/147.

La Contemporaine. L'Argonnaute, avril 1916, référence VAL 117/089.

La Contemporaine, L'Argonnaute. Fond Valois, 12/03/1917, référence VAL 157/096.

La Contemporaine, L'Argonnaute. Fond Valois, 12/03/1917, référence VAL 157/078.

La Contemporaine, L'Argonnaute. Fond Valois, 17/09/1917, référence VAL 157/080.

La Contemporaine, L'Argonnaute. Fond Valois.,17/09/1917, référence VAL 157/083

Library of Congress, Washington D. C.

Library of Congress, Prints and Photographs Division Washington, D.C. Bain News Service photograph collection. 1914 Oct. 29, number LC-B2- 3277-15.

Library of Congress, General John Pershing. General Headquarters, Chaumont France. https://loc.gov/pictures/resource/cph.3a15843/

Library of Congress, Prints and Photographs division de la Bibliothèque du Congrès des États-Unis sous le numéro d'identification ggbain.31564.

Library of Congress, George Grantham Bain Collection numéro d'identification ggbain.37067.

***Imperial War Museum* (IWM)**

Imperial War Museum, number Q 47997. Geiser Theodore (Mons) collection.

Imperial War Museum, number Q 12212.

Imperial War Museum, number Q 3013.

Imperial War Museum, number Q 87870.

Imperial War Museum, number Q 7486A. Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer)

Imperial War Museum, number Q 7518.

Imperial War Museum, number Q 7519.

Imperial War Museum, number Q 7521.

Imperial War Museum, number Q 7522.

Imperial War Museum, number Q 7563.

Imperial War Museum, collection, John Savage (1920–1922), number Q113252.

Imperial War Museum, number Q7561. Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer), 26 avril 1919.

Imperial War Museum, collection, John Savage, number Q113251.

Imperial War Museum, collection John Savage, number Q113258.

Imperial War Museum, collection John Savage, number Q 113254.

Imperial War Museum, collection John Savage, number Q 113257

Imperial War Museum. The disarmament of the german army, 1919-1923, 26 avril 1919, Brooke, John Warwick (Lieutenant) (photographe), number Q 7563.

Imperial War Museum, number ART 5004 5.

Imperial War Museum, Brooke, John Warwick (Lieutenant) (Photographer), 02/08/1917, number Q 5938.

Imperial War Museum, number Q 10376.

Archives cinématographiques

Guerre de mine, Idlib, Syrie https://www.youtube.com/watch?v=u3Fh8Afn0fw

Établissement de Communication et de Production Audiovisuelle de la Défense. (ECPAD)
ECPAD, référence VTS_01_3 14.18 A 586.

ECPAD, référence VTS_01_1 14.18 A 1259

ECPAD, collection Marcel Lorée, référence SPA 37 LO 2219.

Fonds Historique / CNRS Images

CNRS Images. Déminage à Tahure : première explosion. Direction des Inventions, des études et des expériences techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/4265.

CNRS Images. Déminage à Tahure : deuxième explosion. Direction des Inventions, des études et des expériences techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/6709.

CNRS Images. Déminage à Tahure : troisième explosion. Direction des Inventions, des études et des expériences techniques (Producteur). Section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur). https://images.cnrs.fr/video/6711.

National Archives, Washington D. C.

National Archives, Washington DC. Number 111-h-1485-r2.

Institut National Géographique (IGN), Orthophotos

IGN F_PVA_1-0__1935-08-23__C3414-0321_1935_NP12R683_7044.
IGN F_PVA_1-0__1929-04-19__C3613-0251_1929_NP2R2_0021.

IGNF_PVA_1-0__1951-04__C2613-0041_1951_F2613-2713_0137.

IGN, 1922. CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018.

IGN, IGNF_PVA_1-0__1958-06-16__C3312-0081_1958_CDP1332_0485.

IGNF_PVA_1-0__1926-02-24__C3234-0421_1926_NP3_R1_0007.
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001.
IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-09-09__C2611-0141_1929_NP7_1240.
IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-04-22__C2709-0071_1929_NP1R19_0001.
IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-09-05__C2711-0101_1929_NP7_2124.
IGN, 1929, IGNF_PVA_1-0__1929-04-21__C2709-0061_1929_NP1R18_0040 (1).

IGNF_PVA_1-0__1922-08-21__C2810-0041_1922_NP9_0030.
IGNF_PVA_1-0__1947-10-03__C2406-0081_1947_F2406-2506_0065 (2)
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001.
IGN CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0021.IGN C3110-0023_1987_IFN54-55_0574.
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018.
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0018 (1).
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0016 (2).
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF00B-901_1922_CAF_B-90_0017 (1).
IGNF_PVA_1-0__1922-10-04__CCF0B-90B1_1922_CAF_B-90_0001

IGNF_PVA_1-0__1929-09-05__C2711-0101_1929_NP7_2124

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

BRGM, Cartographie LiDAR du parc à munitions sud (Parc Jeannette) à Trélon.

BRGM, Hubé, D., Bâlon, P. (2019), *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse). Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019.*

BRGM. Hubé D., Bâlon P. avec la collaboration de Bodénan F. (2015), *Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55) - Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final.* BRGM/RP-65376-FR, 203 p., 69 fig., 42 tabl., 5 ann.

BRGM. Cartes géologiques BRGM n°134 Feuille Monthois et n°135 Feuille Verdun au 1/50 000. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip.

Collections particulières

Collection particulière, Amis du Hartmannswillerkopf.

Collection particulière. Bataille de Lagarde (département de la Moselle.). Communication personnelle.

Collection particulière, Henry Belot. Communication personnelle

Collection particulière, Henri Bruniaux, Communication personnelle.

Collection particulière, Cardem-Pyro, communication personnelle.

Collection particulière Chrisnord, http://chris59132.canalblog.com/albums/guerre_14_18/index.html

Collection particulière Marie-Odile François. Communication personnelle.

Collection particulière, Général Jacques Guély. Les amis du Patrimoine de l'armement de Bourges.

Collection particulière, Emmanuel Hanotin. Communication personnelle.

Collection particulière, Florian Hensel. https://www.lalsace.fr/actualite/2018/11/11/du-champ-de-bataille-au-site-memoriel

Collection particulière, Daniel Hubé.

Collection particulière, Guillaume Jacquinet, communication personnelle.

Collection particulière, Cécile Offroy.

Collection particulière Philippe. Communication personnelle.

Autres sources iconographiques (dans l'ordre d'apparition dans le manuscrit)

US War Department — *Railway Artillery: A Report on the Characteristics, Scope of Utility, Etc., of Railway Artillery*, Volume I, page 30, by Harry W Miller, United States Army Ordnance Department. Washington, Government Print Office, 1921.

Marc Romanych. *Dicke Bertha. Propaganda photograph of an emplaced prototype Big Bertha howitzer*, (

GL Archive / Alamy Stock Photo. 1915

La Meuse Argonne https://www.g1914-18.com/argonne.html.

Granger Photo Prints and Wall Art. World War One : german bombs. German aerial bombs, with a one-thousand kilogram gift.

1905: Three remarkable men. Kristian Birkeland, Sam Eyde and Marcus Wallenberg are regarded as Hydros founders. https://www.hydro.com/en/global/about-hydro/company-history/1900---1917/1905-three-remarkable-men/

Fritz Haber and Carl Bosch: *The chemists who revolutionized fertilizer production and 'changed the world for the better* (2021) https://geneticliteracyproject.org/2021/01/29/fritz-haber-and-carl-bosch-the-chemists-who-revolutionized-fertilizer-production-changing-agriculture-forever/

Portait de Paul Vieille, 1934, https://tpemunitions.weebly.com/personnages-importants.html

La Nature, N°2004 - 21 octobre 1911 Les poudres et la catastrophe du cuirassé « Liberté», par Denis Blaizot. https://sciences.gloubik.info/spip.php?article283.

Germany's Use of Chemical Warfare in World War I. https://www.firstworldwar.com/features/chemical_warfare.htm

Musée canadien de la guerre. Le Canada et la Première Guerre mondiale. Armes et munitions. Pièces d'artillerie et grenades. https://www.museedelaguerre.ca/premiereguerremondiale/objets-et-photos/armes-et-munitions/pieces-dartillerie-et-grenades/

Ministère de l'Intérieur. Déminage, Sécurité civile. Rapport technique « Gouffre de Jardel ». Annexe photographique. Non daté. Non signé.

Scanning electron micrograph (SEM) depicts *Phanerochaete chrysosporium fungi*; Mag. .5x. Photograph courtesy of UC Reagents. https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:040504062021.jpg

US EPA. *Explosives. Overview of Environmental Issues Associated with Residues of Energetic Materials*. https://clu-in.org/characterization/technologies/exp.cfm

Eugène Turpin (1848-1927). L'inventeur de la Mélinite. https://eugeneturpin.blogspot.com/2007/08/linventeur-de-la-mlinite.html

La guerre de 1870-71 en images. https://www.laguerrede1870enimages.fr/page284.html

Alfred Krupp († 1887). http://www.thyssenkrupp-competition.com/en/presse/bilder.html&photo_id=16

Musée militaire de Lyon. La mobilisation générale de 1914 à Lyon et dans la région. https://museemilitairelyon.com/2021/08/29/la-mobilisation-de-1914/

1er août 1914. akg-images / Alamy Banque D'Images. https://www.alamyimages.fr/photo-image-9-1914-8-0-a5-mobilisation-de-troupes-allemandes-1914-histoire-premiere-guerre-mondiale-mobilisation-aout-1914-depart-d-un-train-a-destination-de-troupes-20740318.html

Collection Detlev Brum. Krieg an der Westfront – Schwarz-Weisse-Begegnungen. Der Krieg auf dem Schlachtfeld und in den "Bezirken der menschlichen Phantasie" Dortmund-postkolonial. Une vision vraisemblablement très raciste et partisane de l'écrasement par le supématie blanche allemande de la « négritude » des troupes coloniales françaises.

Helmuth Johannes Ludwig Von Moltke. Staatsbibliothek zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz. https://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht/?PPN=PPN766452891

Friedrich Wilhelm von Hohenzollern, Kronprinz, im Felde um Verdun. Photographie originale / Original photograph. Date d'édition : 1914. https://www.abebooks.fr/photographies/Friedrich-Wilhelm-Hohenzollern-Kronprinz-Felde-Verdun/30636172467/bd

[pl. 21], dans Société métallurgique de l'Ariège, album de photographies imprimées (18 x 24), 1917, 80 p.

Historisches Museum Saar (HMS), Saarbrücken, Allemagne. https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/saarbruecken/industriegeschichte-giesserei-dingler-und-karcher-saarbruecken-1864-1972_aid-51450881

Louis Henry Auguste Baquet - notice nécrologique dans Matot-Braine de 1924. https://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Henry_Auguste_Baquet#/media/Fichier:Louis_Baquet_Matot-braine.jpg

Dernières Nouvelles d'Alsace. https://cdn-s-www.dna.fr/images/55136FBB-60DD-4A17-B155-5F7DF0DCD9AA/NW_raw/une-sentinelle-dans-les-vosges-a-son-poste-de-tir-1504595294.jpg

The History Department of the US Military Academy West Point.

Simon Jones Historian. Myths of Messines: Killed by their own mine? https://simonjoneshistorian.com/2017/06/12/killed-by-their-own-mine/

Bassano Ltd, vintage print, 1915.

The History Department of the US Military Academy West Point.

Sonagramme https://www.militarysurvey.org.uk/Historic%20Archive/Major%20Conflicts%20and%20Operations/World%20War%201/WW1%20Sound%20Ranging/2.%2011%20Nov%201918%20Sound%20Trace%202.jpg

On the Importance of Bruchmüller. Roads to the Great War. 1914-1918- Arts – Literature – Imagery – Reflection 2014-2018. http://roadstothegreatwar-ww1.blogspot.com/2014/04/on-importance-of-bruchmuller.html

Image Est. Pôle de l'image en région Grand'Est, cote FI-0859-0382.

Balkan Wars 1912-13-Photo Gallery-Part 2. https://macedonia1912-1918.blogspot.com/2017/01/balkan-wars-1912-13-photo-gallery-part-2.html

Musée d'Orsay. Roger Fenton (1819-1869). *The Valley of the Shadow of Death*. www.musee-orsay.fr. Archived from the original on 8th December 2008.

https://www.lavoixdunord.fr/839576/article/2020-07-14/fourmies-ces-obus-de-la-guerre-14-18-qui-ont-continue-de-faire-des-victimes

Clément Jean-Pierre / FTV. https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/aisne/le-village-de-levergies-totalement-evacue-pour-le-deminage-d-obus-et-de-munitions-datant-de-la-premiere-guerre-mondiale-2288821.html

La Guerre de nos Héros. Récits des Hommes pour l'histoire. http://1914-18.be/2010/05/21/depot-de-munitions-abandonne-par-les-allemands-a-bellefontaine/

Liessies – Guerre de 14-18. http://chris59132.canalblog.com/archives/2018/02/26/36178020.html

http://sundgaufront.j-ehret.com/hartwaldlager.html

Collection particulière, Hensel, F. https://www.lalsace.fr/actualite/2018/11/11/du-champ-de-bataille-au-site-memoriel

Collection particulière Chrisnord, http://chris59132.canalblog.com/albums/guerre_14_18/index.html

Hensel, F. (2013), Le Lingekopf. De 1915 à nos jours. Destruction – Remise en état – Revalorisation d'un Champ de Bataille alsacien de la Première Guerre mondiale. Jérôme Do Bentzinger Editeur.

Labarbe, B. (2019) http://raymond57ri.canalblog.com.

https://eodnedex.blog4ever.com/desobusage-1919.

Mémorial, Cimetière américain de Romagne-sous-Montfaucon (département de la Meuse).

https://history.army.mil/html/bookshelves/resmat/wwi/pt04/ch26/pt04-ch26-sec04.html#lg=1&slide=12

Photo © Collection Dupondt/AKG-Images.

Alexandre Millerand en 1914, Agence de presse Meurisse — ebay.com

Gabriel Alapetite. Auteur inconnu — Régine Escallier. https://fr.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Alapetite.

R. Warth. Collection Philippe Springer. Extrait de Springer, P. (2008), *1914-1916. L'Alsace en guerre. Vers le front continu en Haute-Alsace*. Edition Coprur. p. 120.

https://www.lalsace.fr/defense-guerre-conflit/2023/11/04/grande-guerre-la-delicate-gestion-des-morts-au-hartmannswillerkopf

Auguste Wicky en présence de Charles De Gaulle à la libération de Mulhouse, le 21 novembre 1944 https://www.dna.fr/culture-loisirs/2020/11/20/diaporama-la-liberation-de-mulhouse-le-21-novembre-1944-comme-si-vous-y-etiez-zabn

https://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Berthelot#/media/Fichier:Berthelot-Metz_1920_2.jpg

Photographie, bibliothèque municipale de Grenoble.

http://grenoble-cularo.over-blog.com/2020/12/grenoble-pendant-la-1ere-guerre-mondiale-1914-18.html

https://forum.pages14-18.com/viewtopic.php?t=9980

War Department. Army War College. Historical Section. World War I Branch. ca. 1918-ca. 1948, number 11-SC-38546 - NARA - 55236251-cropped.

Journal l'Illustration,1920. https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Armand_Huygh%C3%A9_de_Mahenge#/media/Fichier%3ALe_col_Huyguens_et_Degoutte_Illustration_1920.JPG

François, D. et François, G. (2017), *I want you. Le Corps expéditionnaire américain – France 1917 – 1918*. OREP Editions. 2017, p.276.

Krüger, A. *Der Gasplatz Breloh (1916-1925)* GEKA (Gesellschaft zur Entsorgung von chemische Kampfstoffen und Rüstungsaltlasten mbH. https://www.heidekreis.de/PortalData/2/Resources/verwaltung_und_politik/buergerinformationen/02_GEKA.pdf

Schwendner, A. (2008), *Lost – König der Kampfstoffe*. *Bund deutscher Feuerwerker und Wehrtechniker. Mitteilung 2 / 2008.*

Preuss, J., Eiteberg, F. (1999), *Hallschlag. Historisch-genetische Studie zur ehemaligen Fabrik für die Herstellung von Trinitrotoluol, Dinitrobenzol und Presskörpern aus Sprengstoffen sowie zur Verfüllung und Entlaborierung von Munition der Espargit AG*. Mainzer geographische Studien, Heft 45. Geographisches Institut Der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 1999.

Focus community magazine. Serving Ilfracombe, Hele, Combe Martin, Woolacombe and the surrounding area, March 2013 - Vol 28 N° 3.

Lemattre, M. (2018), d'après le récit d'Etienne Lemaire dactylographié en 1984. *Mémoire d'Opale n°10* - 2018. *Le camp Pickett – Dannes (Pas-de-Calais).*

Anonymus: Man who cleaned-up France: how shells and poison gas were rendered harmless. The Daily Graphic du 26/07/1923.

Patent specification. 162 022. Application date : Dec. 11, 1919. N° 31,084 /19. Complete Left : Oct. 11, 1920. Complete Accepted : Apr. 11, 1921. Means for Breaking Down Gas Shells.

Taylor, S. Hewitt, A., Lever, J., Hayes, C., Perovich, L., Thorne, P. Daghlian, C. (2004), *TNT particle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds. Chemosphere 55* (2004) 357–367.
Schwendner, A. (2009), *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil*.
Bausinger – Seminar Explosivstoffe – 02/07/2014 – IWU Magdeburg. *Temporärer Sprengplatz als Kontaminationsquelle*. Communication personnelle.

Kwon, Man Jae & Finneran, Kevin. (2006), *Microbially Mediated Biodegradation of Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5- Triazine by Extracellular Electron Shuttling Compounds. Applied and environmental microbiology*. 72. 5933-41. 10.1128/AEM.00660-06.

Adilman, D.J., Curry, D., Clausen, J., and Abate, C. Characterization of Perchlorate Plumes in a High Permeability Aquifer.

Hubé, D. (2017). *Industrial-scale destruction of old chemical ammunition near Verdun: a forgotten chapter of the Great War. First World War Studies, 8*(2–3), 205–234. https://doi.org/10.1080/19475020.2017.1393347

Preuss, J. (2001), non publié. Communication personnelle.

Stichelbaut, B. (2007), non publié. Communication personnelle.

Bausinger, T. (2004), non publié. Communication personnelle.

Direction Départementale des Territoires de la Meuse. Communication personnelle.

Thouin, H. (2016). Thèse soutenue par Hugues Thouin le 15 décembre 2016. *Transfert de polluants inorganiques dans un technosol de brûlage d'armes organo-arséniées soumis à un apport de matière organique et à des cycles de saturation/désaturation : expérimentation en mésocosme.* Sciences de la Terre. Université d'Orléans, 2016. Français. ⟨NNT : 2016ORLE2069⟩.

Peter & Salehi, Shahrbanoo. (2013), Human exposure to Brominated dibenzo p-dioxin. Umeå University Human exposure to brominated dibenzo-p-dioxins through ingestion of marine food supplements.
© Association des Amis de Vauquois et sa Région https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip

http://www.memoires-champagne-ardennes.com/ardennes/apremont-sur-aire/index.html Mémoire Champagne Ardenne. Apremont-sur-Aire.

Projet de classement du site de guerre de la Haute-Chevauchée. Rapport de présentation. Extrait.

© R.W. Rennick Collection-McMahan photo. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip

http://humanbonb.free.fr/indexSf.html. L'inscription sur le fronton de l'entrée de la galerie « *Glück Auf !* » est un salut traditionnel du mineur germanique, qui apporterait au salué la chance de découvrir de nouveaux filons de minerais.

https://argonne1418.com/photos-depoque/guerre-des-mines/#jp-carousel-106.

http://palimpsestes.fr/centenaire/photos/argonne2/Images/gourbi_jpg.jpg.

© Association des Amis de Vauquois et sa Région.http://20000lieuessurlenet.over-blog.com/2016/05/la-butte-de-vauquois-4-ans-et-2-jours-de-combat.html

Jérôme Brenot, J., Nicolas Saulière, N., Léty, C., Taborelli, P., Zélie, B., Blondeau, R., Devos, D., Desfossés, Y. (2016), *How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. Geoarchaeology.* 2017;1–15. DOI: 10.1002/gea.21623.

Maps of Vosges front (1915-1918) (1920) Michelin Publisher. Michelin & Cie.

https://linge1915.eu/histoire-bataille-linge-alsace-vosges/ La bataille du Linge, un enfer sur les hauteurs. Mémorial du Linge.

http://souterrains.vestiges.free.fr/spip.php?article51 Weiss, J.F. (2009), *Un extraordinaire épisode de la guerre souterraine dans les Vosges.*

https://macedonia1912-1918.blogspot.com/2017/02/unexploded-bombs-and-bullets-ww1-legacy.html
Unexploded bombs - WW1 Legacy in Mariovo region, Macedonia
Fichez-nous la paix ! 120 dessins de presse.

Publications scientifiques

A

Achenbach, L.A., Michaelidou, U., Bruce, R.A., Fryman J., Coates, J.D. (2001). *Dechloromonas agitata gen. nov., sp. nov. and Dechlorosoma suillum gen. nov., sp. nov., two novel environmentally dominant (per)chlorate-reducing bacteria and their phylogenetic position. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 51: 527-533.

Ader, M., Coleman, M. L., Doyle, S. P., Stroud, M., & Wakelin, D. (2001). *Methods for the stable isotopic analysis of chlorine in chlorate and perchlorate compounds. Analytical Chemistry*, 73(20). 4946-4950.

Ader, M., Chaudhuri, S., Coates, J. D., & Coleman, M. (2008). *Microbial perchlorate reduction: A precise laboratory determination of the chlorine isotope fractionation and its possible biochemical basis. Earth and Planetary Science Letters*, 269(3-4). 605-613.

Adilman, D.J., Curry, D., Clausen, J., and Abate, C. AMEC Earth and Environmental Inc. *Characterization of Perchlorate Plumes in a High Permeability Aquifer*.

Adrian, N. R. (1996). *The biodegradation of propellants M31A1E1 and NOSIH-AA2 in compost, soil slurries, and liquid cultures. Technical Report* 96/83. Champaign, IL: U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories.

Accashian, J.V., Vinopal, R.T., Kim, B., Smets, B.F. (1998). *Aerobic Growth on Nitroglycerin as the Sole Carbon, Nitrogen, and Energy Source by a Mixed Bacterial Culture. Appl Environ Microbiol* 64: https://doi.org/10.1128/AEM.64.9.3300-3304.1998.

Agence de l'Eau Rhin Meuse. *Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse* (octobre 2002).

Agency for Toxicological Substances and Diseases Registry (ATSDR). *Toxicological profile for dinitrotoluenes. Chemical and physical informations.* https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp109-c4.pdf.

Amaral, H.I.F., Fernandes, J., Berg, M., Schwarzenbach, R.P., Kipfer, R. (2009). *Assessing TNT and DNT groundwater contamination by compound-specific isotope analysis and 3H–3He groundwater dating: A case study in Portugal. Chemosphere,* Volume 77, Issue 6, 2009, pp. 805-812, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.011.

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2012). *Avis relatif aux études épidémiologiques portant sur les associations entre une exposition aux ions perchlorate dans l'eau de boisson et la fonction thyroïdienne dans des populations spécifiques*. Saisine 2012-SA-0119. Saisine(s) liée(s) n° 2011-SA-0024 ; 2011-SA-0208 ; 2011-SA-0336. https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012sa0119.pdf

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2014). *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la présence d'ions perchlorate dans le lait infantile et dans l'eau destinée à la consommation humaine*. France Maisons-Alfort: ANSES, 55 p. https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-l%E2%80%99anses-relatif-%C3%A0-la-pr%C3%A9sence-d%E2%80%99ions-perchlorate-dans-le-lait-infantile-et-dans-l

ANSES (2018). Avis de l'ANSES relatif à la pertinence de la ré-évaluation de la valeur guide pour les ions perchlorate dans l'eau destinée à la consommation humaine. Décembre 2018. Saisines n° 2016-SA-0155 et 2017-SA-0170. Saisines liées n° 2011-SA-0024;2011-SA-0208 ; 2011-SA-0336;2012-SA-0119. https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2017SA0170.pdf

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) (2023). *Campagne nationale de mesure de l'occurrence de composés émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine : Métabolites de pesticides – Résidus d'explosifs – 1,4-dioxane*. Maisons-Alfort : ANSES, 85 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/LABORATOIRE2022AST0255Ra.pdf

Attaway, H., & Smith, M. (1993). *Reduction of perchlorate by an anaerobic enrichment culture. Journal of Industrial Microbiology*, 12, 408-412.

B

Baba, A., and Deniz, O. (2004). *Effect of warfare waste on soil: a case study of Gallipoli Peninsula (Turkey). International Journal of Environment and Pollution* 22: 657–675.

Bang, F.B. (1980). *Monitoring pathological changes as they occur in estuaries and in the ocean in order to measure pollution (with special references to invertebrates). Rapp.* P.-v. Réun. Cons. Int. Explor.Mer, 179, 118-24.

Bao, H.; Gu, B. (2004). *Natural perchlorate has a unique oxygen isotope signature. Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 5073-5077.

Bardiya N, Bae J-H (2011). *Dissimilatory perchlorate reduction: A review. Microbiological Research* 166: 237-254.

Batista, Jacimaria R., Amy, Penny S., Chen, Yi-Tung, Papelis, Lambis, Unz, Richard (1998). *Final Report: The Fate and Transport of Perchlorate in a Contaminated Site in the Las Vegas Valley. Part A: Investigation of the Influence of Biological Degradation and Sorption on the Fate of Perchlorate. Part B: Modeling of the Transport of Perchlorate in the Las Vegas Wash. University of Nevada - Las Vegas*.

Battaglia-Brunet, F., Le Guédard, M., Lions, J., Joulian, C., Devau, N., Charron, M., Hubé, D., Hellal, J. Characterization of an agricultural site historically polluted by the destruction of arsenical chemical ammunition from the Great War. AgriAs project "Evaluation and management of arsenic contamination in agricultural soil and water", 2017-2019. http://newprojects.gtk.fi/AgriAs/. Communication orale, congrès As 2018, Péking.

Bausinger T, Preuss J. (2005). *Environmental remnants of the first World War: soil contamination of a burning ground for arsenical ammunition. Bull Environ Contam Toxicol*. 2005 Jun;74(6):1045-52. doi: 10.1007/s00128-005-0686-z. PMID: 16158839.

Bausinger, T., E. Bonnaire, E., and J. Preuß, J. (2008). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. Science of the Total Environment* 382: 259–271.

Bausinger, T., Preuss, J. (2011). *Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunitionim Wald von Spincourt (Frankreich).* Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften. Geographisches Institut. Johannes Gutenberg Universität. Mainz August 2011. Communication personnelle. Non publié.

Bausinger – Seminar Explosivstoffe – 02/07/2014 – IWU Magdeburg. *Temporärer Sprengplatz als Kontaminationsquelle*.

Belp B.R. (1986). *Evaluation of field sampling techniques for estimation of disease incidence. Am. Phytopathological Soc.*, 76 (12) (1986). pp. 1299-1305.

Bema, H., Bou-Rabeeb, F. (2004). *Environmental and health consequences of depleted uranium use in the 1991 Gulf War. Environment International* 30 (2004) 123– 134.

Blehert, D. S. Becker, K. and Chambliss, G. H. (1996). *Isolation and characterization of bacteria that degrade nitroglycerin.* In Proceedings of the Tri-Service Environmental Technology Workshop. Enhancing Readiness through Environmental Quality Technology, pp. 197–204, Defense Technical Information Center, Hershey, Pa, USA, May 1996, ADP017715.

Blok, C., De Kreij, C., Baas, R. O. B., & Wever, G. (2008). *Analytical methods used in soilless cultivation. Soilless culture, theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, 245-290.

Bodenan, F.; Garrido, F. (2004). *Devenir des dioxines dans les sols. Analyse critique de données bibliographiques. Rapport final*. BRGM/RP-53070-FR, 66 p »et « Bodenan, F. ; Michel. P. ; Cary, L. (2013) Dioxines/furanes dans les sols français : troisième état des lieux. Analyses 1998-2012. Rapport final. BRGM/RP-63111-FR, 31 p., 4 ann.

Bodenan, F., Michel, P. (2013). *Dioxines dans les sols français : troisième état des lieux – analyses 1998 – 2012*. Rapport final. BRGM / RP – 63111 – FR. Décembre 2013.

Böhlke, J. K.; Sturchio, N. C.; Gu, B.; Horita, J.; Brown, G. M.; Jackson, W. A.; Batista, J.; Hatzinger, P. B. (2005). *Perchlorate isotope forensics. Anal. Chem*. 2005, 77, 7838 - 7842.

Böhlke, J. K.; Hatzinger, P. B.; Sturchio, N. C.; Abbene, I. J.; Mroczkowski, S. J. (2009). *Atacama perchlorate as an agricultural contaminant in groundwater: Isotopic and chronologic evidence from Long Island, New York. Environ. Sci. Technol*. 2009, 43, 5619–5624.

Böhlke, J. K., Mroczkowski, S. J., Sturchio, N. C., Heraty, L. J., Richman, K. W., Sullivan, D. B., & Hatzinger, P. B. (2017). *Stable isotope analyses of oxygen (^{18}O: ^{17}O: ^{16}O) and chlorine (^{37}Cl: ^{35}Cl) in perchlorate: reference materials, calibrations, methods, and interferences. Rapid Communications in Mass Spectrometry,* 31(1). 85-110.

Bohn, M.A. (2007). *Wenn Explosivstoff älter wird – wird er auch empfindlicher ? Kampfmittelbeseitigung und der Faktor Zeit- Untersuchungen zu Veränderung in der Empfindlichkeit*.

Boopathy, R. (2000). *Bioremediation of explosives contaminated soil. International Biodeterioration & Biodegradation,* Volume 46, Issue 1, 2000, pp. 29-36, ISSN 0964-8305, https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00051-2.

Brenot, J., Saulière, N., Léty, C., Taborelli, P., Zélie, B., Blondeau, R., Devos, A., Desfossés, Y. (2017). *How much did the soldiers dig? A quantification of WW1 remains in Argonne, France. Geoarchaeology*. 2017;1–15.

BRGM. Cartes géologiques BRGM n°134 Feuille Monthois et n°135 Feuille Verdun au 1/50 000. https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=260&p=3descrip.

Bruce, R.A., Achenbach, L.A., Coates, J.D. (1999). *Reduction of (per)chlorate by a novel organism isolated from paper mill waste. Environmental Microbiology* 1: 319-329.

Bruhn C, Lenke H, Knackmuss H. (1987). *Nitrosubstituted Aromatic Compounds as Nitrogen Source for Bacteria. Appl Environ Microbiol* 53. https://doi.org/10.1128/aem.53.1.208-210.

Bumpus J. A., and M. Tatarko (1994). *Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene by Phanerochaete chrysosporium: identification of initial degradation products and the discovery of a TNT metabolite that inhibits lignin peroxidases. Curr. Microbiol.* 28:185-190.

Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2017) Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Aktualisierte und überarbeitete Fassung. https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf

Burrows, W. D., M. O. Schmidt, R. H. Chyrek, and C. I. Noss. (1988). *Photochemistry of aqueous nitroguanidine. Technical Report 8808* (ADA-203200). Fort Detrick, MD: U.S. Army Biomedical Research and Development Laboratory.

C

Cao, F., F. (2020). *Approche interdisciplinaire pour la caractérisation hydrogéologique du milieu crayeux : application au transfert de perchlorates dans la craie de Champagne*. Thèse de doctorat. Reims. Mars 2020.

Carroll, C. (2023). *Unexploded Ordnance Is Scattered Across Ukraine's Front Lines*. UMD Researchers Are Mapping Hot Spots With AI, Maryland Today, 19 juillet 2023.

Celi, M. (1991). *The impact of bombs of World War 1 on limestone slope of Monte Grappa. Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas* -I.G.U.- U.I.S.-Italy 15-27 Sept. 1991 ; Quaderni del Dipartimento di Geografia n. 13. 1991 -Università di Padova. pp. 279-287.

Certini, G., Scalenghe, R., and Woods, W.I. (2013). *The impact of warfare on the soil environment. Earth-Science Review* 127 (2013): 2.

Chmielinska, K., Hube, D., Bausinger, T., Simon, M., Riviere, G., Fauser, P., & Sanderson, H. (2019). *Environmental contamination with persistent cyclic mustard gas impurities and transformation products. Global Security: Health, Science & Policy* – An Open Access Journal, 4(1). 14-23. https://doi.org/10.1080/23779497.2019.1699848.

Christodoulatos, C. Bhaumik, S., Brodman, B. W. (1997). *Anaerobic biodegradation of nitroglycerin. Water Research,* Volume 31, Issue 6, 1997, pp.1462-1470, ISSN 0043-1354, https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00390-9.

Clozel-Leloup, B., Fourniguet, F., Camizuli, E., Ponchant, P., Crouzet, C., Baudron, J.C. (2009). *Présence naturelle dans les sols lorrains : cartographie en vue de la détermination des zones d'exposition de la population. Rapport final*. BRGM/RP-54635-FR. Décembre 2009.

Coates, J.D., Michaelidou, U., Bruce, R.A., O'Connor, S.M., Crespi, J.N., and Achenbach L.A. (1999). *Ubiquity and Diversity of Dissimilatory (Per)chlorate-Reducing Bacteria. Appl. Environ. Microbiol*. 1999, 65(12):5234.

Coates, J. D., & Achenbach, L. A. (2004). *Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism. Nature Reviews Microbiology,* 2(7). 569-580.

Crawford, R. L. (1995). *Biodegradation of nitrated munitions compounds and herbicides by obligately anaerobic bacteria. In Biodegradation of Nitroaromatic Compounds*, J. C. Spain, Ed., Plenum Press, New York, NY, USA, 1995.

D

Dasgupta, P. K., Dyke, J. V., Kirk, A. B., & Jackson, W. A. (2006). *Perchlorate in the United States. Analysis of relative source contributions to the food chain. Environmental science & technology*, 40(21). 6608-6614.

Dauphin, L., Doyle, C. (2000). U.S. Army Defence Ammunition Center—Technical Center for Explosives Safety. *Study of ammunition dud and low order detonation rates. Technical Report* written for U.S. Army Environmental Center, Aberdeen Proving Ground, Maryland.

Dave, G., E. Nillson, and Wernersson, A.S. (2000). *Sediment and water phase toxicity and UV-activation of six chemicals used in military explosives. Aquatic Ecosystem Health and Management* 3: 291-299.

Den Otter, J.H., Pröfrock, D., Bünning, T.H., Strehse, J.S., Van der Heijden, A. E. D. M. and E. Maser, E. (2023). *Release of Ammunition-Related Compounds from a Dutch Marine Dump Site. Toxics*. 2023 Mar; 11(3): 238.

Denayer, F.O., Van Haluwyn, C., de Foucault, B. et al. (1999). *Use of bryological communities as a diagnostic tool of heavy metal soil contamination (Cd, Pb, Zn) in northern France. Plant Ecology* 140, 191–201 (1999). https://doi.org/10.1023/A:1009771209869.

Dickel, O., and Knackmuss. H.-J. (1991). *Catabolism of 1,3-dinitrobenzene by Rhodococcus sp. QT-1. Arch. Microbiol.* 157:76-79.

DoD (U.S. Department of Defence). 2012. Manual Number 6055.09-M, Volume 8. DoD Ammunition and *Explosives Safety Standards: Glossary*. https://www.wbdg.org/FFC/DOD/DODMAN/605509-M-V8.pdf.

Drzyzga, O. (2003). *Diphenylamine and derivatives in the environment: a review. Chemosphere,* Volume 53, Issue 8,2003, Pages 809-818, ISSN 0045-6535. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00613-1.

F

Fabian, G.L., and S. Ostazeski (2002). *Corrosion of unexploded ordnance (final report).* U.S. Army Environmental Center Report SFIM-AEC-PC-CR-2002041.

Fauvel, P.J. (1984). Approche sédimentologique de la Gaize d'Argonne (France). Note présentée au 5e Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille.

Fauvel, P.J. et Petit, G. (1984). Sédimentation argilo-carbonatée du Crétacé moyen de Champagne (France). Note présentée au 5e Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille.

Fernando, T., J. A. Bumpus, and S. D. Aust. (1990). *Biodegradation of TNT (2,4,6- trinitrotoluene) by Phanerochaete chrysosporium. Appl. Environ. Microbiol*. 56:1666-1671.

Fisher, G.L., Prentice, B.A., Silberman, D., Ondov, J.M., Biermann, A.H., Ragaini, R.C., and McFarland, A.R. (1978). *Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. Environmental Science and Technology* 12, 447 – 451.

Francken, F., Hafez, A.M. (2009). *Case Study in Modeling Dispersion of Yperite and Clark I and II from Munitions at Paardenmarkt. Belgium Marine Technology Society Journal*, Volume 43, Number 4, Fall 2009, pp. 52-61(10). doi: https://doi.org/10.4031/MTSJ.43.4.3A.

Freedman, D. L., B. M. Caenepeel, and B. J. Kim (1996). *Biotransformation of nitrocellulose under methanogenic conditions. Water Science and Technology* 34(5-6): 327-334.

Freedman, D. L., J. M. Cashwell, and B. J. Kim (2002). *Biotransformation of explosive grade nitrocellulose under denitrifying and sulfidogenic conditions. Waste Management* 22: 283-292.

G

Galmiche, M., Colin, A., Clavos, M.C., Pallez, C., Rosin, C. and Dauchy, X. (2021) *Determination of nitroaromatic explosive residues in water by stir bar sorptive extraction-gas chromatography-tandem mass*

spectrometry. Analytical and Bioanalytical Chemistry 413 (1): 159-169. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00216-020-02985-y.

Gardner, M., Alvarez, G.H., Ku, Y. (1982). *Microbial degradation of ^{14}C-diphenylamine in a laboratory model sewage sludge system. Bull Environ Contam Toxicol* 28:91–96.

Garrido, F., Hénault, C., Gaillard, H., Pérez, S., Germon, J.C. (2002). *N_2O and NO emissions by agricultural soils with low hydraulic potentials. Soil Biology and Biochemistry,* Volume 34, Issue 5, 2002, pp.559-575, ISSN 0038-0717, https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00172-9.

Genin, M., Fumery, M., Occelli, F., Savoye, G., Pariente, B., Dauchet, L., & Ficheur, G. (2020). *Fine-scale geographical distribution and ecological risk factors for Crohn's disease in France (2007-2014). Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 51(1). 139-148.

Gesche, H., Hofmann K.W., Trachtmann, N., Walters, D.M., Rouvière, P. and Knackmuss, H.J. (2002). *npd gene functions of Rhodococcus (opacus) erythropolis HL PM-1 in the initial steps of 2,4,6-trinitrophenol degradation bbThe GenBank accession number for the sequence reported in this paper is AF435009. Microbiology.* Volume 148, Issue 3. https://doi.org/10.1099/00221287-148-3-799.

Gibbs, T. R., and Popolato, A. (1980). *LASL explosive property data*. 61-68. Berkeley, CA : University of California.

Gidarakos, E. (2015). *War and environmental impacts. Waste management* (New York, N.Y.). 35. 1-2. 10.1016/j.wasman.2014.10.007.

Gorecki, S., Nesslany, S., Hubé, d., Mullot, J.U., Vasseur, P., Marchioni, E., Camel, V., Noël, L., Le Bizec, B., Guérin, T., Feidt, C., Archer, X., Mahe, A., Rivière, G. (2017). *Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War. Science of The Total Environment.* Volumes 599–600, 1 December 2017, Pages 314-323.

Gouvernement du Canada. Fiche descriptive : *Dioxines et furanes*. https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/Contfs.aspx?ID=66&lang=fra

Gregory, K. B., Larese-Casanova, P., Parkin, G. F., and Scherer, M. M. (2004). *Abiotic transformation of hexahydro-1,3,5-trinito-1,3,5-triazine by Fe II bound to magnetite. Environmental Science and Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1408–1414, 2004.

Gu, B., Brown, G.M., Maya, L., Lance, M.J., Moyer, B.A. (2001). *Regeneration of Perchlorate (ClO_4^-) Loaded Anion Exchange Resins by a Novel Tetrachloroferrate ($FeCl_4^-$) Displacement Technique. Environ. Sci. Technol*. 35, 3363–3368. https://doi.org/10.1021/es010604i.

Gu, B., Brown, G.M. (2006). *Recent Advances in Ion Exchange for Perchlorate Treatment, Recovery and Destruction*, in: Gu, B., Coates, J.D. (Eds.). *Perchlorate: Environmental Occurrence, Interactions and Treatment*. Springer US, Boston, MA, pp. 209–251. https://doi.org/10.1007/0-387-31113-0_10.

Gu, B., Brown, G.M., Chiang, C.-C. (2007). *Treatment of Perchlorate-Contaminated Groundwater Using Highly Selective, Regenerable Ion-Exchange Technologies. Environ. Sci. Technol*. 41, 6277–6282. https://doi.org/10.1021/es0706910.

H

Haderlein, S. B., Weissmahr, K. W. and Schwarzenbach, R. P. (1996). *Specific adsorption of nitroaromatic explosives and pesticides to clay minerals. Environmental Science and Technology*, vol. 30, no. 2, pp. 612–622, 1996.

Haderlein, S. B., Hofstetter, T. B., & Schwarzenbach, R. P. (2000). *Subsurface chemistry of nitroaromatic compounds. Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives*, 311-356.

Haag, W.R., Spanggord, R., Mill, T., Podoll, R.T., Chou, T.-W., Tse, D.S. and Harper, J.C. (1990). *Aquatic environmental fate of nitroguanidine. Environmental Toxicology and Chemistry*, 9: 1359-1367. https://doi.org/10.1002/etc.5620091105.

Haas, R., Schmidt, T., Steinbach, K. et al. (1998). *Chromatographic determination of phenylarsenic compounds. Fresenius J Anal Chem* 361, 313–318 (1998). https://doi.org/10.1007/s002160050892.

Hanaoka, S., Nagasawa, E., Nomura, K., Yamazawa, M., & Ishizaki, M. (2005). *Determination of diphenylarsenic compounds related to abandoned chemical warfare agents in environmental samples. Applied organometallic chemistry*, 19(2). 265-275.

Hamilton, W.A. (1983). *The role of sulfate-reducing bacteria in anaerobic corrosion. Journal of Applied Bacteriology*, 55(3): R3–R3.

Hamilton, W.A. (1985). *Sulfate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. Annual. Review of Microbiology*, 39: 195–217.

Hamilton, W.A. (1998). *Bioenergetics of sulphate-reducing bacteria in relation to their environmental impact. Biodegradation,* 9(3–4): 201–212.

Hamilton, W.A. (2003). *Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: A unifying electron transfer hypothesis. Biofouling*, 19(1): 65–76.

Han, S., Mukherji, S.T., Rice, A., Hughes, J.B. (2011). *Determination of 2,4- and 2,6-dinitrotoluene biodegradation limits. Chemosphere,* Volume 85, Issue 5, 2011, Pages 848-853, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.100.

Hatzinger, P. B., Böhlke, J. K., Sturchio, N. C., Gu, B., Heraty, L. J., & Borden, R. C. (2009). *Fractionation of stable isotopes in perchlorate and nitrate during in situ biodegradation in a sandy aquifer. Environmental Chemistry*, 6(1). 44-52.

Hatzinger, P., B. Shaw Environmental Inc. Lawrenceville (2011). *Using Stable Isotope Ratio Analysis to Distinguish Perchlorate Sources*.

Hatzinger, P. B., Böhlke, J. K., Jackson, W. A., Gu, B., Mroczkowski, S. J., & Sturchio, N. C. (2022). *Isotopic discrimination of natural and anthropogenic perchlorate sources in groundwater in a semi-arid region of northeastern Oregon (USA). Applied Geochemistry*, 139, 105232.

Hawari, J., Halasz, A., Beaudet, S., Ampleman, G., and Thiboutot. S. (1999). *Biotransformation of 2,4,6,-trinitrotoluene (TNT) with Phanerochaete chrysosporium in agitated cultures at pH 4.5. Appl. Environ. Microbiol*. 65:2977-2986.

Heaton, T.H.E (1986). *Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. Chemical Geology*, 59, 87-102.

Helmisaari, H. S., Derome, J., Fritze, H., Nieminen, T., Palmgren, K., Salemaa, M., & Vanha-Majamaa, I. (1995). *Copper in Scots pine forests around a heavy-metal smelter in south-western Finland. Water, air, and soil pollution*, 85, 1727-1732.

Hofmann, K.W., Knackmuss, H., Heiss, G. (2004). *Nitrite Elimination and Hydrolytic Ring Cleavage in 2,4,6-Trinitrophenol (Picric Acid) Degradation. Appl Environ Microbiol* 70: https://doi.org/10.1128/AEM.70.5.2854-2860.

Hubé, D., Bausinger, T. (2014). *Marquage pyrotechnique : analyse de la problématique environnementale. Comparatif entre Allemagne et France. Géologues* n°179. p 32 – 36.

Hubé, D. (2017). *Industrial-scale destruction of old chemical ammunition near Verdun: a forgotten chapter of the Great War, First World War Studies*.

Hubé D. (2019). *Recherche de l'origine de l'empreinte perchloratée des eaux du Massif des Vosges. Etudes sectorielles (54,68). Rapport final*. BRGM/RP-68790-FR, 196 p., 56 fig., 18 tabl., 3 ann., CD.

Hubé, D., Cailleau, C. (2019). *14-18. Sites historiques d'élimination d'engins de guerre de l'entre-deux-guerres. Inventaire national (état 2018) et retour d'expérience sur leurs conséquences environnementales. Rapport final*. BRGM/RP-68476-FR, 191 p., 3 ann.

Hubé, D., Bâlon, P. (2019). *Complexe de désobusage « Clere & Schwander » (Canton de Spincourt, Meuse) Diagnostic et Interprétation de l'Etat des Milieux. Rapport final*. BRGM/RP-68907-FR. Octobre 2019.

Hubé, D. (2023). *Restes explosifs de guerre et brutalisation environnementale en Ukraine : une comparaison avec la Grande Guerre* https://www.politika.io/fr/article/restes-explosifs-guerre-brutalisation-environnementale-ukraine-comparaison-grande-guerre.

Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2006). *Introducing 'bombturbation,' A Singular Type of Disturbance and Mixing. Soil Science* 171, no. 11 (November 2006): 828.

Hupy, J.P., and Schaetzl, R.J. (2008). *Soil development on the WWI battlefield of Verdun, France. Geoderma* 145 (2008): 37-49.

Hupy, J.P. Koehler, T. (2012). *Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. Geomorphology* 157-158.

Hutzinger, O. Ghulam Ghaus Choudhry, G. Chittim, B.G., Johnston, L.E. (1985). *Formation of Polychiorinated Dibenzofurans and Dioxins during Combustion, Electrical Equipment Fires and PCB Incineration. Environmental Health Perspectives*. Vol. 60, pp. 3-9, 1985.

I

IABG (1999). Untersuchung der Rüstungsaltlastverdachtsstandortein Bayern. *Vertiefte historische Erkundung der Einzelstandorte. Arbeitshilfe Nutzungsspezifische Kontaminationsspektren*.

INERIS (2006) *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques – Dioxines*. https://substances.ineris.fr/sites/default/files/archives/1746-01-6%20--%202%2C3%2C7%2C8-TCDD%20--%20FDTE.pdf

Ishii K, Tamaoka A, Otsuka F, Iwasaki N, Shin K, Matsui A, Endo G, Kumagai Y, Ishii T, Shoji S, Ogata T, Ishizaki M, Doi M, Shimojo N. (2004). *Diphenylarsinic acid poisoning from chemical weapons in Kamisu, Japan. Ann Neurol*. 2004 Nov;56(5):741-5. doi: 10.1002/ana.20290. PMID: 15505777.

J

Jackson, W. A.; Anandam, S.-K.; Anderson, T.; Lehman, T.; Rainwater, K.; Rajagopalan, S.; Ridley, M. K.; Tock, R. (2005). *Perchlorate occurrence in the Texas southern high plains aquifer system. Ground Water Monitor. Remed.* 2005b, 25, 137-149.

Jackson W. A., Bohlke J. K., Gu B. H., Hatzinger P. B. and Sturchio N. C. (2010). *Isotopic composition and origin of indigenous natural perchlorate and co-occurring nitrate in the Southwestern United States. Environ. Sci. Technol.* 44, 4869-4876.

Jackson W. A., Bohlke J. K., Andraski B. J., Fahlquist L., Bexfield L., Eckardt F. D., Gates J. B., Davila A. F., McKay C. P. and Rao B. (2015). *Global patterns and environmental controls of perchlorate and nitrate co-occurrence in arid and semi-arid environments. Geochim. Cosmochim. Acta* 164, 502–522.

Jansson, S. (2008). *Thermal Formation and Chlorination of Dioxins and Dioxin-Like Compounds*. UMEÅ University Department of Chemistry.

Jenkins, T.F., Hewitt, A.D., Grant, C.L., Thiboutot, S. Pennington, J.C. (2006). *Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges. Chemosphere,* Volume 63, Issue 8, May 2006, Pages 1280-1290.

Joos, A. (2008). KORA. Themenverbund 5 (TV5) « Rüstungsaltlasten » (2008) KORA. Leitfaden. *Einschätzung und Berücksichtigung natürlicher Schadstoffverminderungsprozesse auf Standorte die mit sprengstofftypischen Verbindungen sowie deren Transformationsproduckten belastet sind. Prozessverständnis, Methoden, Referenzstandorte. Empfehlungen und Hinweise zur Eizelfallbeartbetung*.

Juhasz, A. L. and Naidu, R. (2007). *Explosives: fate, dynamics, and ecological impact in terrestrial and marine environments. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 191, pp. 163–215, 2007.

Jung, Hyejung & Koh, Dong-Chan & Kim, Yun & Jeen, Sung-Wook & Lee, Jeonghoon. (2020). *Stable Isotopes of Water and Nitrate for the Identification of Groundwater Flowpaths: A Review. Water*. 12. 138. 10.3390/w12010138.

Jurczak, W., Fabisiak, J. (2017). *Corrosion of ammunition dumped in the Baltic Sea. Journal of Konbin.*

K

Kajiyama, F., and K. Okamura (1999). *Evaluating cathodic protection reliability on steel pipe in microbially active soils. Corrosion,* 55(1): 74–80.

Kalderis, D., Juhasz, A. L., Boopathy, R., and Comfort, S. (2011). *Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report). Pure and Applied Chemistry,* vol. 83, no. 7, pp. 1407–1484, 2011.

Karim K, Gupta SK (2001). *Biotransformation of nitrophenols in upflow anaerobic sludge blanket reactors. Bioresour Technol.* 2001 Dec;80(3):179-86. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00092-x. PMID: 11601541.

Kendall C., McDonnel J.J. (1998). *Isotope tracers in catchment hydrology.* Elsevier Science B.V., Amsterdam, 839 p.

Kwon, Man Jae & Finneran, Kevin. (2006). *Microbially Mediated Biodegradation of Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5- Triazine by Extracellular Electron Shuttling Compounds. Applied and environmental microbiology*. 72. 5933-41. 10.1128/AEM.00660-06.

L

Laurain, M., Menillet, F. et Pluchery. E. avec la collaboration de Duermael, G., Fauvel, P.J. et Thévenin, S. (1998). Notice de la Carte Géologique au 1/50 000 n° 134 Feuille de Monthois. BRGM Ed. 56 p.

Le Forestier, L., and Libourel, G. (1998). *Characterization of flue gas residues from municipal solid waste combustors. Environmental Science and Technology* 32, 2250-2256.

Le Guedard, M., Schrauwers, B., Larrieu, I., Bessoule, J.J., (2008). *Development of a biomarker for metal bioavailability: the lettuce fatty acid composition. Environ. Toxicol. Chem*. 27, 1147–1151. https://doi.org/10.1897/07-277.1.

Lendenmann, U., Spain, J. C. and Smets, B. F. (1998). *Simultaneous biodegradation of 2,4-dinitrotoluene and 2,6-dinitrotoluene in an aerobic fluidized-bed biofilm reactor. Environmental Science and Technology,* vol. 32, no. 1, pp. 82–87, 1998.

Lever J., S. Taylor, L. Perovich, K. Bjella, and B. Packer (in prep) *Dissolution of Composition B*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory

Levlin, E. (1996). *Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: In situ monitoring cell current and potential. Corrosion Science*, 38(12): 2083–2090.

Lewis, J., Burman, J. Edlund, C., Simonsson, L., Berglind, R., Leffler, P., Qvarfort, U., Thiboutot, S., Ampleman, G., Meuken, D., Duvalois, W., Martel, R., Sjöström, J. (2013). *The effect of subsurface military detonations on vadose zone hydraulic conductivity, contaminant transport and aquifer recharge. Journal of Contaminant Hydrology* 14. p 8–15.

Lewis, J., Burman, J., Edlund, C., Simonsson, S., Berglind, R., Leffler, P., Qvarfort, U., Thiboutot, S., Amp, G. (2013). *The effect of subsurface military detonations on vadose zone hydraulic conductivity, contaminant transport and aquifer recharge. Journal of Contamina Hydrology*. 146 (2013) 8 -15.

Li, S.Y., Y.G. Kim, K.S. Jeon, Y.T. Kho, and T. Kang (2001). Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. Corrosion, 57(9): 815–828.

Lohs, K.H. (1991). *Der Krieg endet nicht am Tag des letzten Schusses*, Spectrum 22, H. 2, 24 -26.

Lynch, J.C, J.M. Brannon, and J.J. Delfino (2002). *Dissolution rates of three high explosive compounds: TNT, RDX and HMX. Chemosphere,* 47: 725–734.

M

Mahne, I., Tiedje, J.M. (1995). *Criteria and methodology for identifying respiratory denitrifiers. Appl Environ Microbiol* 61:1110–1115.

Marshall, S.J., White, G.F. (2001). *Complete denitration of nitroglycerin by bacteria isolated from a washwater soakaway. Appl Environ Microbiol*. 2001 Jun;67(6):2622-6. doi: 10.1128/AEM.67.6.2622-2626.2001.

Matyskiela (2003). *Modeling of chemical transport from UXO to surrounding soil. Final Report* submitted to Praxis Environmental Technologies, Burlingame, California.

McGrath, C. J. (1995). *Review of formulations for processes affecting the subsurface transport of explosives. Tech. Rep.* IRRP-95-2, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, USA, 1995.

McTavish, H., Kuglin Schweitzer, J., Jun Oh, D., Kotharu, P. and Turnbull, M. University of Minnesota and Rakesh K. Chauhan, J.A. and Pandey, G. Institute of Microbial Technology, Chandigarh, India. *Nitrophenol Family Pathway Map (an/aerobic)* http://eawag-bbd.ethz.ch/nphe/nphe_map.html;

Meharg, A.A., Macnair, M.R. (1992). *Suppression of the High Affinity Phosphate Uptake System: A Mechanism of Arsenate Tolerance in Holcus lanatus L., Journal of Experimental Botany*, Volume 43, Issue 4, April 1992, Pages 519–524, https://doi.org/10.1093/jxb/43.4.519.

Meerschman, E., Cockx, L., Monirul Islam, M., Meeuws, F., Van Meirvenne, M. (2011). *Geostatistical Assessment of the Impact of World War I on the Spatial Occurrence of Soil Heavy Metals*. AMBIO.

Mirecki, J., E.; Porter, B., Weiss, Jr., Charles A. (2006). *Environmental Transport and Fate Process Descriptors for Propellant Compounds*.

Morin, S., Savarino, J., Frey, M.M., Domine, F., Jacobi, H.-W., Kaleschke, L., Martins, J.M.F. (2009). *Comprehensive isotopic composition of atmospheric nitrate in the Atlantic Ocean boundary layer from 65°S to 79°N. J. Geophys. Res. Atmospheres* 114. https://doi.org/10.1029/2008JD010696..

Munro, N.B., Talmage, S.S., Griffin, G.D., Waters, L.C., Watson, A.P., King, J.F., Hauschild, V. (1999). *The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products. Environ Health Perspect.* 1999 Dec;107(12):933-74. doi: 10.1289/ehp.99107933. PMID: 10585900; PMCID: PMC1566810.

Murayama, N., Yamamoto, H., and Shibata, J. (2002). *Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. International Journal of Mineral Processing* 64, 1 – 17.

N

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019). *Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions*. Washington, D.C: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25140.

Negrel, P., Ollivier, P., Flehoc, C., Hube, D. (2017). *An innovative application of stable isotopes (δ2H and δ18O) for tracing pollutant plumes in groundwater, Science of The Total Environment*, Volume 578, 2017, pages 495-501, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.214.

Nishino, S. F., Spain, J. C. and He, Z. (2000). *Strategies for aerobic degradation of nitroaromatic compounds by bacteria: process discovery to field application*. 7-62.

Norin, M., and T.G. Vinka (2003). *Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment. Materials and Corrosion—Werkstoffe Und Korrosion*, 54(9): 641–651.

O

OECD 106: Adsorption - Desorption Using a Batch Equilibrium Method.

OECD 121: Estimation of the Adsorption Coefficient (K_{oc}) on Soil and on Sewage Sludge using High Performance Liquid Chromatography (HPLC).

OMS (1998). Executive summary : Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the tolerable daily intake (TDI). WHO Consultation, May 25-29, 1998, Geneva.

Ornstein, R. Ehrlich, P. (1989). *New World, New Mind : Changing the Way we Think to Save our Future.* Paladin, Grafton Books, London.

Ostazeski, S., Saubier, L.F. (2002). *Corrosion of Buried Mines*. U.S. Army Aberdeen Test Center.U.S. Army Environmental Center.

P

Parker, B. Chendorain, M., Lloyd, S. (2004). SERDP Final Technical Report - *UXO Corrosion – Potential Contamination Source*. April 2004.

Penhale, H.R. (1971). *Corrosion of mild steel plates in some New-Zealand soils, New Zealand Journal of Science*, 14(2): 336–337.

Pennington, J. C. and Patrick, W. H. Jr. (1990). *Adsorption and desorption of 2,4,6-trinitrotoluene by soils. Journal of Environmental Quality,* vol. 19, no. 3, pp. 559–567, 1990.

Pennington, J. C., Gunnison, D., Harrelson, D. W. et al., (1999). *Natural attenuation of explosives in soil and water systems at Department of Defence sites: interim report. Tech. Rep*. EL-99-8, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, USA, 1999.

Pennington, J. C., T. F. Jenkins, J. M. Brannon, J. Lynch, T. A. Ranney, T. E. Berry, Jr., C. A. Hayes, P. H. Miyares, M. E. Walsh, A. D. Hewitt, N. Perron, and J. J. Delfino (2001). *Distribution and fate of energetics on DoD Test and training ranges: Interim Report 1*. ERDC TR-01-13. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Pennington, J. C., & Brannon, J. M. (2002). *Environmental fate of explosives. Thermochimica acta*, 384(1-2). 163-172.

Pennington, J. C., Jenkins, T. F., Ampleman G. et al., (2006). *Distribution and fate of energetics on DOD test and training ranges: interim report 6*. TR 06-12, Strategic Environmental Research and Development Program, US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss, USA, 2006.

Pennington, J. C., K. Poe, B. Silverblatt, C. A. Hayes, and S. A. Yost. (2006). *Explosive residues from low-order detonations of artillery munitions, Chapter 9*, In *Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: Interim Report 6*. ERDC TR-06-12. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Perruchon, C., Batianis, C., Zouborlis, S. et al., (2015). *Isolation of a diphenylamine-degrading bacterium and characterization of its metabolic capacities, bioremediation and bioaugmentation potential. Environ Sci Pollut Res* 22, 19485–19496 (2015). https://doi.org/10.1007/s11356-015-5132-0.

Petrova O.E., Tarasova N.B., Davydova M.N. (2002). *Biotechnological potential of sulfate-reducing bacteria for transformation of nitrocellulose. Anaerobe. 2002* Dec;8(6):315-7. doi: 10.1016/S1075-9964(03)00029-5. PMID: 16887675.

Parker, D.R. (2009). *Perchlorates in the environment – the key current issues. Environ. Chem*. 2009, 6, 1–2. doi:10.1071/EN09016. Reducing bacteria for the transformation of nitrocellulose. Anaerobe 8:315-317.

Phelan J.M., S.W. Webb, J.V. Romero, J.L. Barnett, F. Griffin and M. Eliassi (2003). *Measurement and modeling of energetic material mass transfer to soil pore water*—Project CP-1227. Sandia Report 2003-0153.

Pirc, S., Budkovic, T. (1996). *Remains of World War I geochemical pollution in the landscape. In: Richardson, M. (ed) Environmental xenobiotics*. Taylor & Francis, Hertfordshire, pp 375-418.

Pichtel, J. (2012). *Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2012, Article ID 617236, 33 pages, 2012. https://doi.org/10.1155/2012/617236.

Pirard, C., Focant, J.F. & De Pauw, E. (2002). *An improved clean-up strategy for simultaneous analysis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD). polychlorinated dibenzofurans (PCDF). and polychlorinated biphenyls (PCB) in fatty food samples. Anal Bioanal Chem* 372, 373–381 (2002).

Plantamura, J., Bousquet, A., Valéro, E., Vest, P. Renard. C. (2011). *Les arsines vomitives : toxiques chimiques toujours d'actualité ? Médecine et armées,* 2011, 39, 5, 453-457

Plummer, L. N.; Böhlke, J. K.; Doughten, M. W. (2006). *Perchlorate in Pleistocene and Holocene groundwater in north-central New Mexico. Environ. Sci. Technol.* 2006, 40, 1757 - 1763.

Poghosyan, A., Sturchio, N.C., Morrison, C.G., Beloso, A.D. Jr., Guan, Y., Eiler, J.M., Jackson, W.A. and Hatzinger P.B. (2014). *Perchlorate in The Great Lakes: Isotopic Composition and Origin. Environ. Sci. Technol.* 2014, 48, 11146 – 11153.

Polesell, S., Quevauviller, P. (2018). *Qu'est-ce qu'un polluant émergent ? Exemples. Techniques analytiques pour les polluants émergents. Techniques de l'ingénieur*.

Preuß, J. (2006). *Rüstungsaltlasten in Deutschland: Die Entstehung bis zum Jahr 1945*. In: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz & HIMASG (Hrsg.): *Boden gut gemacht. Die Sanierung des Rüstungsaltstandortes Stadtallendorf.* Stadtallendorf: 21-51.

Preuss, J., Eitelberg, F., Dehner, U., Albrecht, G., Laskowski, S. (2000). *Modellhafte Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und – vernichtung nach dem 1. Weltkrieg. Standorte Zweedorf und Nüssau. Band 1. Historische Erkundung.* Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dezember 2000.

Preuß, J., Eitelberg, F., Albrecht, G., Mauder, S., Dehner, U., Laskowsi, S. (2002). *Altlastenuntersuchung an ausgewählten Standorten der Munitionszerlegung und -vernichtung nach dem Ersten Weltkrieg*. Umweltbundesamt. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 299 76 240. UBA-FB 000293. Texte 49 / 2.

Q

Querol, X., Moreno, N., Umaña, J., Alastuey, A., Hernández, E., López-Soler, A., and Plana, F. (2002). *Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. International Journal of Coal Geology* 50, 413 – 423.

R

Radtke, C.W., Gianotto, D., Roberto, F.F., (2002). *Effects of particulate explosives on estimating contamination at a historical explosives testing area. Chemosphere* 46, 3–9.

Rajagopalan, S.; Anderson, T.A.; Fahlquist, L.; Rainwater, K.A.; Ridley, M.; Jackson, W.A. (2006). *Widespread presence of naturally occurring perchlorate in high plains of Texas 803 and New Mexico. Environ. Sci. Technol.* 40:3156 – 3162.

Rao B, Anderson TA, Orris G, Rainwater KA, Rajagopalan S, Sandvig RM, Scanlon BR, Stonestrom DA, Walvoord MA, Jackson WA (2007). *Widespread natural perchlorate in unsaturated zones of the Southwest United States. Environ Sci Technol* 41:4522 – 4528.

Région Grand'Est, ARS (2022). *Petit journal Santé Environnement à l'heure du bilan du PRSE Grand'Est 2017-2021*.

Reifler R. G. and Smets, B. F. (2000). *Enzymatic reduction of 2,4,6-trinitrotoluene and related nitroarenes: kinetics linked to one-electron redox potentials. Environmental Science and Technology*, vol. 34, no. 18, pp. 3900–3906, 2000.

Rengel, Z. (2000). *Ecotypes of Holcus lanatus Tolerant to Zinc Toxicity also Tolerate Zinc Deficiency, Annals of Botany,* Volume 86, Issue 6, 2000, pages 1119-1126, ISSN 0305-7364, https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1282.

S

Savarino, J., Morin, S., Erbland, J., Grannec, F., Patey, M.D., Vicars, W., Alexander, B., Achterberg, E.P. (2013). *Isotopic composition of atmospheric nitrate in a tropical marine boundary layer. Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 17668–17673. https://doi.org/10.1073/pnas.1216639110.

Scheibner, K., Hofrichter, M. and Fritsche, W. (1997). *Mineralization of 2-amino-4,6- dinitrotoluene by manganese peroxidase of the white-rot fungus Nematoloma frowardii. Biotechnol Lett*. 19:835-839.

Schenzle, A. & Lenke, H & Fischer, P & Williams, Peter & Knackmuss, H.-J. (1997). *Catabolism of 3-Nitrophenol by Ralstonia eutropha JMP 134. Applied and environmental microbiology.* 63. 1421-7. 10.1128/AEM.63.4.1421-1427.1997.

Schnell, E. (2014). *Vieillissement des munitions chimiques de la Première Guerre mondiale en France. Etat des lieux et analyse des risques. Propositions pour une meilleure prévention des accidents*. ENSCM.

Schutt, H.U., and P.R. Rhodes (1996). *Corrosion in an aqueous hydrogen sulfide, ammonia, and oxygen system. Corrosion,* 52(12): 947–952.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.2 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA. Anhang 1 Historische Hintergrundinformationen (noch in Bearbeitung)*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009). *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.1 Erfahrungen bei der Sprengplatzbearbeitung in Deutschland*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.2 Kenntnisstand zu Schieß- und Sprengplätzen in den USA*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.3 Vergleich von Untersuchungsmethoden.*

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.4 Gefährdungsabschätzung Streugebiete*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.5 Methodenvergleich zur Lokalisierung von Sprengtrichtern*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.6 Exemplarische Untersuchung von Beutemunition*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 2.7 Hinweise zum Umweltverhalten Explosivstofftypischer Verbindungen*.

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 3.1 Abkürzungsverzeichnis / Glossar.*

Schwendner, A. (2009). LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) *Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Anhang 3.2 Quellen-/Literaturverzeichnis.*

Selwitz, C. (1988). *Cellulose nitrate in conservation*. In Research in conservation. 2. John Paul Getty Trust, CA: The Getty Conservation Institute. Available for download at http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/nitrate.pdf (5 Jun 2005).

Shahrbanoo, P. (2013). *Human exposure to Brominated dibenzo p-dioxin*. Umeå University Human exposure to brominated diben- zo-p-dioxins through ingestion of marine food supplements.

Sheremata, T. W., Thiboutot, S., Ampleman, G., Paquet, L., Halasz, A., and Hawari, J. (1999). *Fate of 2,4,6-trinitrotoluene and its metabolites in natural and model soil systems. Environmental Science and Technology,* vol. 33, no. 22, pp. 4002–4008, 1999.

Shigemoto, N., Hayashi, H., and Miyaura, K. (1993). *Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. Journal of Materials Science* 28, 4781 – 4786.

Shin, K.A., Spain, J.C. (2009). *Pathway and Evolutionary Implications of Diphenylamine Biodegradation by Burkholderia sp. Strain JS667. Appl Environ Microbiol* 75: https://doi.org/10.1128/AEM.02198-08.

Shrout, J., Scheetz, T., Casavant, T., Parkin, G. (2005). *Isolation and characterization of autotrophic, hydrogen-utilizing, perchlorate-reducing bacteria. Applied Microbiology and Biotechnology* 67: 261-268.

Silva, J., Chock, T. (2016). *Munitions integrity and corrosion features observed during the HUMMA deep-sea munitions disposal site investigations. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* Volume 128, June 2016, Pages 14-24.

Silva, J.A.K., Taylor, C. (2016). *Munitions integrity and corrosion features observed during the HUMMA deep-sea munitions disposal site investigation.* Deep-Sea Research II 128 (2016) 14-24.

Simic, M. (1996). *Po sledeh Soške fronte. Založba* Mladinska knjiga, Ljubljana.

Sisson, D.H., MacLean, S.C., Shultz, R.K., Borg, R.J. (1979). *A preliminary study of the migration of technecium in soil underhydrous conditions.* National Technical Service UCRL 52832, 1979; US Department of commerce.

Souvent, P., Pirc, S. (2001). *Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities. Environmental Geology* 40 (3).

Spain, J. C. (1995). *Biodegradation of nitroaromatic compounds. Environmental Science Research Series*, Vol. 49, Plenum Press, New York.

Spain, J. C., Hughes, J.B. Knackmuss, H.-J. (2000). *Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives*. CRC Press, Boca Raton.

Stroo, H. F., & Ward, C. H. (Eds.). (2008). *In situ bioremediation of perchlorate in groundwater.* Springer Science & Business Media.

Sturchio NC, Böhlke J.K., Gu B, Horita J, Brown G.M., Beloso A.D. Jr, Hatzinger P.B., Jackson W.A., Batista J.R. (2006). *Stable isotopic compositions of chlorine and oxygen in synthetic and natural perchlorates.* In: *Perchlorate Environmental Occurrences, Interactions, and Treatment*. Gu B, Coates J.D. (eds.) Springer, New York.

Sturchio, N.C., Böhlke, J.K., Gu, B., Hatzinger, P.B., Jackson, W.A., (2012). *Isotopic tracing of perchlorate in the environment*. In: Baskaran, M. (Ed.). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, vol. I.* Springer Berlin Heidelberg, pp. 437-452.

Sturchio, N.C., Hoaglund III, J.R., Marroquin, R.J., Beloso Jr., A.D., Heraty, L.J., Bortz, S.E., Patterson, T.L., (2012). *Isotopic mapping of perchlorate plumes. Ground Water* 50, 94–102.

Sturchio, N.C., Beloso A. Jr., Heraty, L.J., Wheatcraft, S., Schumer, R. (2014). *Isotopic Tracing of Perchlorate Sources in Groundwater from Pomona, California. Applied Geochemistry* (2014). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.01.012.

Sun, Y., Gustavson, R., Ali, N., Weber, K., Westphal, L., Coates, J. (2009). *Behavioral response of dissimilatory perchlorate-reducing bacteria to different electron acceptors. Applied Microbiology and Biotechnology* 84: 955-963.

T

Taborelli, P., Devos, A., Laratte, S., Desfossés, Y. Brenot, J. (2017). *Typologie et organisation spatiale des « polémo-formes » de la Grande Guerre révélées par l'outil LiDAR et les plans directeurs. Application à la Champagne et à l'Argonne. Site de la revue de Géographie Historique*, Volume 10.

Taylor, S. Hewitt, A., Lever, J., Hayes, C., Perovich, L., Thorne, P. Daghlian, C. (2004). *TNT particle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds. Chemosphere* 55 (2004) 357–367.

Taylor S., J. Lever, L. Perovich, E. Campbell, and J. Pennington (2004b) *A study of Composition B particle from 81-mm mortar detonations.* Sustainable Range Management Conference.

Tešan Tomić, N., Smiljanić, S., Jović, M. et al. (2018). *Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines, and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit: Part 1—Pseudo-total Concentration. Water Air Soil Pollut* 229, 301 (2018).. https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0.

Tešan Tomić, N., Smiljanić, S., Jović, M. et al. (2018). *Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit; Part 2: Determination of Heavy Metal Fractions. Water Air Soil Pollut* 229, 303 (2018). https://doi.org/10.1007/s11270-018-3950-7.

Thorn, K. A., Pettigrew, P. J., Goldenberg, W. S., & Weber, E. J. (1996,). *Covalent binding of aniline to humic substances. 2. 15N NMR studies of nucleophilic addition reactions. Environmental science & technology,* 30(9). 2764-2775.

Thouin, H (2016). *Transfert de polluants inorganiques dans un technosol de brûlage d'armes organo-arséniées soumis à un apport de matière organique et à des cycles de saturation/désaturation : expérimentation en mésocosme*. Thèse de doctorat soutenue le 15/12/2016.

Tørnes, J. A., Øyvind, V., Ljønes, A., Opstad, M., Aase M, Bjerkeseth L. H., Hussain, F. (2002). *Investigation and risk assessment of ships loaded with chemical ammunition scuttled in Skagerrak* TA-1907/2002.

Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N., Peterson, E.R. (2006). *The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds, Toxicological Sciences,* Volume 93, Issue 2, October 2006, Pages 223–241, https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055.

U

Urbansky, E. T., Brown, S. K., Magnuson, M. L., Kelty, C. A. (2001). *Perchlorate levels in samples of sodium nitrate fertilizer derived from Chilean caliche. Environmental Pollution*. 112: 299-302.

Urbansky E.T.(2002). *Perchlorate as an environmental contaminant. Environ Sci Pollut* Res 9:187–192. https://doi.org/10.1007/BF02987487

Urbansky, E., & Brown, S. (2003). *Perchlorate retention and mobility in soils. Journal of Environmental Monitoring* 5(3):455-62 https://doi.org/10.1039/B301125A

United Nations Environment Programme, UNEP (2003). *Depleted Uranium in Bosnia and Herzegovina*. Post-Conflict Environmental Assessment. Revised Edition: May 2003.

U.S. Army Armement Research and Development Command (USA-ARDEC). 1983.

US EPA. *Explosives. Overview of Environmental Issues Associated with Residues of Energetic Materials*. https://clu-in.org/characterization/technologies/exp.cfm

V

Van den Berg, M., Birnbaum L.S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto J, Tysklind M, Walker N, Peterson, R.E. (2006). *The 2005 World Health Organization reevaluation of human and Mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. Toxicol Sci.* 2006 Oct;93(2):223-41. doi: 10.1093/toxsci/kfl055. Epub 2006 Jul 7. PMID: 16829543; PMCID: PMC2290740.

Van Meirvenne, M., T. Meklit, S. Verstraete, M. De Boever, F. Tack. (2008). *Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the soil around Ypres? European Journal of Soil Science* 59: 372–379.

Van Staëvel, E. (2006). *La pollution sauvage. A chacun ses pollutions*. Presses Universitaires de France.

Vega, M., Nerenberg, R., & Vargas, I. T. (2018,). *Perchlorate contamination in Chile: Legacy, challenges, and potential solutions. Environmental research*, 164, 316-326. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.034..

Vehlow, J., Birnbaum, L., Koppel, W. (1997). *Arsen and Antimon in der Müllverbrennung. Abfallwirtschaftsjournal*. 1997 ; 9 :9 – 19.

Videla, H.A. (2000). *An overview of mechanisms by which sulphate-reducing bacteria influence corrosion of steel in marine environments. Biofouling*, 15(1–3): 37–47.

W

Wallace, W., Ward, T., Breen, A., & Attaway, H. (1996). *Identification of an anaerobic bacterium which reduces perchlorate and chlorate as Wolinella succinogenes. Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 16(1). 68-72.

Walsh, M.E., C.A. Ramsey, and T.F. Jenkins (2002). *The effect of particle size reduction by grinding on sub-sampling variance of explosives residues in soil. Chemosphere*, 49: 1267–1273.

Walsh, M.E., Collins, C.M., Hewitt, A.D., Walsh, M.R., Jenkins, T.F., Stark, J., Gelvin, A. B., Douglas, T., Perron, N., Lambert, D., Bailey, R., and Myers, K. (2004). *Range characterization studies at Donnelly training area, Alaska 2001 and 2002*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Technical Report ERDC/CRREL TR-04-5.

Walsh M.E. et al (2013). *Perchlorate contamination from the detonation of insensitive high-explosive rounds. Journal of Hazardous Materials* 262 (2013) 228–233.

Weisberg, B. (1970). *Ecocide in Indochina. The ecology of war Paperback* – January 1, Canfield Press; First Edition.

Wendt, T.M. Cornell, J.H. and Kaplan, A.M. (1978). *Microbial degradation of glycerol nitrates. Applied and Environmental Microbiology,* vol. 36, no. 5, pp. 693–699, 1978.

White, G.F., Snape, J.R., Nicklin, S. (1996). *Bacterial biodegradation of glycerol trinitrate. International Biodeterioration & Biodegradation,* Volume 38, Issue 2, 1996, pp. 77-82, ISSN 0964-8305, https://doi.org/10.1016/S0964-8305(96)00028-5.

Widory D., Kloppmann W., Chery L., Bonnin J., Rochdi H. (2004). *Nitrates in groundwater: an isotopic multi-tracer approach. Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 72, pp. 165-188.

Williams, A.E., Johnson, J.A., Lund, L.J. and Kabala, Z.J. (1998). *Spatial and Temporal Variations in Nitrate Contamination of a Rural Aquifer, California. Journal of Environmental Quality*, 27: 1147-1157. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700050021x.

Williams, O. H., & Rintoul-Hynes, N. L. J. (2022). *Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle. European Journal of Soil Science*, 73(4). e13297. https://doi.org/10.1111/ejss.13297.

Won, W.D., Heckly, R.J., Glover, D.J., and Hoffsommer, J.C. (1974). *Metabolic disposition of 2,4,6-trinitrotoluene. Appl. Microbiol*. 27:13-66.

X

Xu, X., Gao, B., Jin, B., Zhen, H., Wang, X., Dai, M. (2015). *Study of microbial perchlorate reduction: Considering of multiple pH, electron acceptors and donors. Journal of Hazardous Materials* 285 (2015) 228–235.

Y

Yamamoto, H., Morley, M. C., Speitel, G. E. and Clausen, J. (2004). *Fate and transport of high explosives in a sandy soil: adsorption and desorption. Soil and Sediment Contamination*, vol. 13, no. 5, pp. 459–477, 2004.

Yang, H., Halasz, A., Zhao, J.S., Monteil-Rivera, F., Hawari, J. (2008). *Experimental evidence for in situ natural attenuation of 2,4- and 2,6-dinitrotoluene in marine sediment. Chemosphere*, Volume 70, Issue 5, 2008, pp 791-799, ISSN 0045-6535, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.014.

Young, E. D., Galy, A., & Nagahara, H. (2002). *Kinetic and equilibrium mass-dependent isotope fractionation laws in nature and their geochemical and cosmochemical significance. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(6). 1095-1104.

Z

Zeyer, J., and Kearney, P. C. (1984). *Degradation of o-nitrophenol and m-nitrophenol by a Pseudomonas putida. J. Agric. Food Chem.* 32:238-242.

Annexes

ANNEXE A
Résultats analytiques sur les échantillons d'ergols solides et d'explosifs

Analyses quantitatives en composés inorganiques des explosifs explicitement perchloratés (laboratoire BRGM)

Libélé	Typologie de l'explosif	Facteur L/S (L/kg)	ClO_3^-	ClO_4^-	ClO_4^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^-	F^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Na / ClO_3	NH_4/ClO_4	K/ClO_4
			mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mmol/mmol	mmol/mmol	mmol/mmol
Cheddite	Cheddite, France. La Corniche, Argonne	-	**69 423,93**	**1 003,78**	1,00	< 0,1	< 0,01	0,51	< 0,1	152,42	2,04	< 0,10	47,25	**18 470,14**	5,02	56,39	0,97	2,80	142,94
CHE 1		10,09	**75 181,00**	**2 037,00**	2,04	< 0,5	< 0,10	5,10	72,70	**23 505,00**	< 0,5	< 0,10	24,20	**15 443,00**	3,30	172,00	0,75	13,83	214,84
CHE 2		8,73	**738 558,00**	**4 320,00**	4,32	< 0,5	< 0,10	7,10	< 0,5	**41 327,00**	< 0,5	< 0,10	55,90	**143 587,00**	1,40	62,00	0,71	9,08	36,52
58T	Explosif, "Crapouillot" 58T, France. La Corniche, Argonne	9,36	18,30	**3 853 056,00**	**3 853,06**	24,90	< 0,10	**2 555,00**	227,00	512,00	< 0,5	< 0,10	1,20	20,40	< 1,0	11,70	4,05	3,66	0,01
FOUR S'	Charge de destruction, France. Vauquois.	9,99	**941,00**	420,00	0,42	**247,00**	< 0,10	23,60	**267,00**	65,80	**296,00**	0,87	21,90	**1 279,00**	2,10	159,00	4,93	310,48	963,23
PERD1	Perdite, Allemagne. Galerie A3, la Haute Chevauchée, Argonne.	10,13	<20	**7 805,00**	**7,81**	80,00	-	202,00	5,90	-	-	-	-	11,20	-	**3 426,00**	-	-	1 116,86
PERD2		10,08	<20	**40 456,00**	**40,46**	36,00	-	**1 072,00**	1,80	-	-	-	-	9,60	-	**21 845,00**	-	-	1 373,89
PERD3		0,1	<20	143,00	0,14	<1	-	1,80	<1	-	-	-	-	<1	-	31,50	-	-	560,48

Analyses quantitatives des composés nitroaromatiques (laboratoire Envilytix)

Analyses isotopiques C, N (université du Delaware)						O	O			O	O		O			O	O			O	O			O	O		O			O	O	
Composé	**Laboratoire. Méthode**	**Origine, famille**	**Acronyme**	**Limite de quantification estimée (ng/L) (par défaut)**	**Unité**	**gam v0**	**gam v02**	**gam v1**	**gam v2**	**gam v3**	**gam v4**	**gam1**	**gam2**	**gam3**	**rad**	**tnt1**	**tnt2**	**tnt3**	**Unité**	**gam v0**	**gam v02**	**gam v1**	**gam v2**	**gam v3**	**gam v4**	**gam1**	**gam2**	**gam3**	**rad**	**tnt1**	**tnt2**	**tnt3**
						Grenades à manche allemandes									Explosif, mine	Chargement obus				Grenades à manche allemandes									Explosif, mine	Chargement obus		
						17/12/2019														17/12/2019												
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Envilytix GmbH, Allemagne. HPLC - DAD	Métabolites du TNT	2-ADNT	1	g/kg	**20**	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	2,00%	0,30%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
4-Amino-2,6-dinitrotoluène			4-ADNT	1	g/kg	**27**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	2,70%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
3,5-Dinitroaniline		Explosif	3,5-DNA	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2,4-Dinitrotoluène		Explosifs, propulseurs et métabolites du TNT	2,4-DNT	1	g/kg	**82**	**103**	<	71	**574**	**379**	**226**	**660**	**75**	**12**	<	<	<	%	8,20%	10,30%	<	7,10%	57,40%	37,90%	22,60%	66,00%	7,50%	1,20%	<	<	<
2,6-Dinitrotoluène			2,6-DNT	1	g/kg	<	<	**387**	<	1	**24**	<	**27**	<	<	<	<	<	%	<	<	38,70%	<	0,10%	2,40%	<	2,70%	<	<	<	<	<
1,3,5-Trinitrobenzène		Impureté du DNB	1,3,5-TNT	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2,4,6-Trinitrotoluène		Explosif	2,4,6-TNT	1	g/kg	**386**	**437**	<	<	<	<	**112**	<	<	5	**952**	<	10	%	38,60%	43,70%	<	<	<	<	11,20%	<	<	0,50%	95,20%	<	1,00%
1,2-Dinitrobenzène		Explosif	1,2-DNB	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1,3-Dinitrobenzène			1,3-DNB	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**751**	**510**	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	75,10%	51,00%
2-Nitroaniline		Intermédiaires de synthèse	2-NA	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
3-Nitroaniline			3-NA	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1-Nitronaphthalène		Intermédiaires de synthèse du DNN	1-NN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	6	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,60%
2-Nitronaphthalène			2-NN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1,3-Dinitronaphthalène		Explosifs	1,3-DNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	1	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,10%
1,5-Dinitronaphthalène			1,5-DNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	4	<	4	**72**	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,40%	<	0,40%	7,20%
1,6-Dinitronaphthalène			1,6-DNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	5	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,50%
1,8-Dinitronaphthalène			1,8-DNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	2	<	9	**13**	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,20%	<	0,90%	1,30%
1,3,5-Trinitronaphthalène			1,3,5-TNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	5	2	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,50%	0,20%
1,3,8-Trinitronaphthalène			1,3,8-TNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**54**	**13**	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	5,40%	1,30%
1,4,5-Trinitronaphthalène			1,4,5-TNN	1	g/kg	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**11**	3	%	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	1,10%	0,30%

Analyses quantitatives en composés inorganiques des explosifs nitrés d'artillerie (laboratoire BRGM)

Libélé	Typologie des explosifs	ClO_3^-	ClO_4^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	NH_4+NO_3	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^-	F^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Fe	Silice	Zn	As
		mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg	µg/kg
EXP CONT	Explosif, projectiles allemands ouverts. Conteville, Somme.	< 0,1	412,8	66,1	-	66,1	**132,3**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
conte 1 Lix_1.1 lix		< 0,5	< 5	**1040**	-	< 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4710	452
conte 2 Lix_2.1 lix		< 0,5	< 5	**778**	-	< 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2770	251
Amatol, obus allemand de 155 mm	Fragments d'explosifs ou prélèvement d'explosifs sur projectiles ouverts	<1	<5	**483,0**	-	44,0	**527,0**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Amatol, obus allemand de 210 mm		**54**	182,0	36,0	-	46,0	82,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dinitrobenzène, obus allemand de 105 mm		<0,2	<5	19,0	-	13,0	32,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT, obus allemand de 105 mm		<0,2	<5	12,0	-	17,0	29,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT, partie ogivale d'un obus allemand		<0,5	126,0	39,0	-	52,0	91,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT1		**1,60**	**6375,5**	72,20	-	35,40	**107,6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT2		0,50	38,3	78,33	-	17,27	95,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT3		**2,16**	**3467,8**	**3573,03**	-	**194,26**	**3767,3**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT4		<0,5	556,7	**152,42**	-	30,82	**183,2**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT5		<0,5	0	55,77	-	**239,12**	**294,9**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNT7		<0,5	467,7	41,72	-	18,87	60,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DNB1	Dinitrobenzène, 105 mm	<0,5	14,6	8,10	-	2,47	10,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TNN1	Fragment	**2,82**	139,3	**149,29**	-	**109,72**	**259,0**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RAD. Résidus de pains d'explosif allemands. Galerie Raderstollen, Vauquois.	Explosifs de sureté allemands nitrés nitratés. Charges de la guerre de mine. Argonne.	< 0,1	169,0	70,29	-	4,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Donarite (Fille morte).		**27,9**	**3046,2**	**133,1**	1,17	**465,9**	**599,0**	23,4	112,1	< 0,1	-	101,7	203,0	6,8	172,8	-	-	-	-
Westfalit.		**9,4**	117,6	**543,0**	2,36	7,56	**550,6**	< 0,1	< 0,1	1,89	-	12,2	45,1	< ,1	17,5	-	-	-	-
Donarite BDC.		**12,5**	540,3	**13498,4**	< 0,01	**3592,9**	**17091,3**	175,0	279,1	154,15	-	159,3	291,1	9,9	79,4	-	-	-	-
Dyn. Gum dynamite	Dynamite - gomme. France. Argonne.	**43,3**	315,2	**205,4**	58,46	2,37	**207,8**	47,4	23,7	< 0,1	-	283,4	119,9	11,6	47,0	-	-	-	-
MAG	Explosif d'engins de tranchée allemand "Maganer"	0,1	45,9	27,9	9,7	**230**	**257,9**	3,4	6,3	< 0,5	< 0,10	2,5	4,4	< 1,0	21,1	2,1	1,9	-	-
PRCEL	Explosif d'engins de tranchée français "Celerier"	< 20,0	17,9	< 1,0	< 0,10	**121**	**121,0**	880	43,2	< 1,0	-	71,1	< 1,0	1,6	225	-	-	-	-
PRNIC	Projectile de tranchée	< 20,0	512	**5400**	**1046**	< 1,0	**5400,0**	436	2,9	< 1,0	-	390	52,3	16,1	**3446**	-	-	-	-
PRMAUS	Minenwerfer "Mauser", Allemagne	< 20,0	< 5,0	**222**	91,7	43,5	**265,5**	23,8	15,5	< 1,0	-	845	16,1	14,5	16,6	-	-	-	-

Analyses quantitatives en composés inorganiques des explosifs nitrés des grenades à manches allemandes (laboratoire BRGM)

Libellé	ClO_3^-	ClO_4^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	NH_4+NO_3	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^-	F^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Fe	Silice	Na / ClO_3	NH_4/ClO_4	K/ClO_4	NH_4/NO_3
	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mmol/mmol	mmol/mmol	mmol/mmol	mmol/mmol
Amatol, german stick hand grenade 24	<1	**325,00**	62,00	-	109,00	171,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1853,19	-	6,06
TNT, german stick hand grenade 24	<1	**119,00**	30,00	-	79,00	109,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3668,23	-	9,07
TNT, german stick hand grenade 24	< 0,05	13,00	16,00	-	73,00	89,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31028,12	-	15,72
TNT, german stick hand grenade 24	<0,05	7,00	29,00	-	12,00	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9472,38	-	1,43
GAM V0	0,24	**44 925,54**	43,89	-	43,16	**87,05**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,31	-	3,39
GAM V01	**11,41**	**68 789,76**	24,85	-	62,13	**86,98**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,99	-	8,61
GAM V02	**2,80**	**293 086,98**	**182,53**	-	33,14	**215,66**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,62	-	0,63
GAM V1	< 0,1	**38 575,62**	35,14	-	73,08	**108,22**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,47	-	7,16
GAM V2	0,50	**27 095,84**	**167,71**	-	11,65	**179,36**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,38	-	0,24
GAM V3	**1,95**	**64 521,49**	67,97	-	62,65	**130,63**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,37	-	3,17
GAM V4	**13,08**	**106 690,66**	25,41	-	11,79	**37,19**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61	-	1,60
GAM VAU 1	**253,00**	**581,00**	191,00	37,40	5,10	**196,10**	4,80	69,10	< 0,5	< 0,10	7,10	49,90	1,50	**227,00**	21,60	9,6	0,72	48,50	994,11	0,09
GAM VAU 2	0,10	**41 195,00**	16,10	54,50	80,20	**96,30**	12,10	94,80	< 0,5	< 0,10	< 1,0	22,90	< 1,0	**217,00**	29,20	2,2	830,97	10,76	13,40	17,16
GAM VAU 3	0,20	**433,00**	6,30	< 0,10	214,00	**220,30**	27,00	18,60	< 0,5	< 0,10	< 1,0	4,00	< 1,0	11,10	89,80	2,8	72,57	2730,88	65,23	117,00
GAM VAU 4	0,00	**44 539,00**	13,00	58,80	107,00	**120,00**	8,80	85,60	< 0,5	0,40	2,00	35,20	1,70	**308,00**	82,80	5,4	-	13,27	17,60	28,35
GAM1	0,47	**80,37**	28,20	-	41,08	**69,28**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2824,17	-	5,02
GAM2	**49,99**	**26,20**	38,99	-	57,69	**96,68**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12168,88	-	5,10
GAM3	**3,18**	**1 802,13**	38,00	-	89,57	**127,57**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	274,62	-	8,12
COR GAM 1	**1,40**	**12 048,00**	**157,00**	3,80	16,70	**173,70**	4,70	7,00	< 0,5	< 0,10	42,80	3,40	12,10	54,50	2,62	4,5	8,81	7,66	11,51	0,37
COR GAM 2	**1,20**	**134,00**	18,60	9,55	**5 982,00**	**6 000,60**	3,20	13,20	< 0,5	< 0,10	31,20	1,50	4,00	2,10	2,09	5,2	4,54	246670,70	39,87	1107,78
HG1	< 20,0	**87 817,00**	21,40	24,80	312,00	**333,40**	55,60	207,00	< 1,0	-	< 1,0	8,50	< 1,0	15,20	-	-	-	19,63	0,44	50,22
HG2	< 20,0	**74 288,00**	21,50	0,91	357,00	**378,50**	**305,00**	154,00	< 1,0	-	14,30	2,50	3,10	96,00	-	-	-	26,55	3,29	57,19
HG3	< 20,0	**37 913 119,00**	**4 473,00**	< 0,10	**1 830,00**	**6 303,00**	**179,00**	7,10	< 1,0	-	65,20	5,90	4,00	**10 657,00**	-	-	-	0,27	0,72	1,41
HG4	< 20,0	**4 633,00**	20,10	3,28	88,50	**108,60**	17,80	15,00	< 1,0	-	< 1,0	14,00	< 1,0	13,90	-	-	-	105,55	7,63	15,17
HG5	< 20,0	**72 203,00**	25,60	2,57	93,90	**119,50**	22,70	19,00	< 1,0	-	24,30	5,90	3,10	25,50	-	-	-	7,19	0,90	12,63
HG6	< 20,0	**1 518,00**	135,00	4,14	150,00	**285,00**	16,50	158,00	< 1,0	-	< 1,0	**140,00**	< 1,0	**315,00**	-	-	-	546,00	527,98	3,83
GR5	< 20,0	**48 259,00**	23,80	4,08	200,00	**223,80**	3,50	47,30	< 1,0	-	1,10	2,70	< 1,0	44,10	-	-	-	22,90	2,33	28,94

Analyses quantitatives des composés nitroaromatiques des éluat d'une *Perdite* du système A3 (Haute-Chevauchée, Argonne) et des eaux issues de ce système (laboratoire LHN, ANSES)

Composé	*Acronyme*	*N° CAS*	*2021.80.1* *"A3" (eau de la galerie)*	*Unité A3*	*2021.80.3* *"A3 Lixiviat" Perdite*	Unité A3 Lixiviat
2-Nitrotoluène	2-NT	88-72-2	10	ng/L	225	µg/L
3-Nitrotoluène	3-NT	99-08-1	21	ng/L	407	µg/L
4-Nitrotoluène	4-NT	99-99-0	8,5	ng/L	**1 405**	µg/L
2,6-Dinitrotoluène	2,6-DNT	606-20-2	3,9	ng/L	97	µg/L
2,5-Dinitrotoluène	2,5-DNT	619-15-8	**332**	ng/L	19	µg/L
2,3-Dinitrotoluène	2,3-DNT	602-01-7	1,7	ng/L	**52 000**	µg/L
2,4-Dinitrotoluène	2,4-DNT	121-14-2	17	ng/L	**169 000**	µg/L
3,5-Dinitrotoluène	3,5-DNT	618-85-9	Traces	ng/L	**2 316**	µg/L
3,4-Dinitrotoluène	3,4-DNT	610-39-9	2,2	ng/L	**60 000**	µg/L
2,4,6-Trinitrotoluène	2,4,6-TNT / TNT	118-96-7	212	ng/L	**2 551**	µg/L
Nitrobenzène	NB	98-95-3	< 10	ng/L	69	µg/L
1-chloro-3-nitrobenzene	1-Cl-3-NB	121-73-3	< 1	ng/L	< 0,400 (Traces)	µg/L
1-chloro-2+4-nitrobenzene	1-Cl-2+4-NB	88-73-3	< 2	ng/L	1,5	µg/L
Dinitrochlorobenzène	DNCB	97-00-7	< 50	ng/L	< 100	µg/L
1,4-Dinitrobenzène	1,4-DNB	100-25-4	< 20	ng/L	< 200	µg/L
1,3-Dinitrobenzène	1,3-DNB	99-65-0	42	ng/L	**3 046**	µg/L
1,2-Dinitrobenzène	1,2-DNB	528-29-0	< 20 (Traces)	ng/L	401	µg/L
2 Nitrophénol	2-NPh	88-75-5	< 20	ng/L	< 8 (Traces)	µg/L
2-Nitroaniline	2-NA	88-74-4	< 20	ng/L	< 8 (Traces)	µg/L
1-Nitronaphtalène	1-NN	86-57-7	3,5	ng/L	61	µg/L
2-Nitronaphtalène	2-NN	581-89-5	< 10	ng/L	< 4 (Traces)	µg/L
1,5-Dinitronaphtalène	1,5-DNN	605-71-0	2,1	ng/L	3,3	µg/L
1,3-Dinitronaphtalène	1,3-DNN	606-37-1	< 10	ng/L	< 4	µg/L
1,6-Dinitronaphtalène	1,6-DNN	607-46-5	< 10	ng/L	< 4	µg/L
1,8-Dinitronaphtalène	1,8-DNN	602-38-0	21	ng/L	< 8 (Traces)	µg/L
Diphénylamine	DPA	122-39-4	< 5	ng/L	< 5	µg/L
2-Nitrodiphénylamine	2-Nitro-DPA	119-75-5	< 1	ng/L	< 1	µg/L
4-Nitrodiphénylamine	4-Nitro-DPA	836-30-6	< 20	ng/L	< 20	µg/L
Dinitroanisole (2,4)	DNAN	119-27-7	< 20	ng/L	< 40	µg/L
2,3-Dimethyl-2,3-dinitrobutane	DMNB	3964-18-9	< 50	ng/L	< 20	µg/L

Analyses quantitatives en composés inorganiques des poudres propulsives des cartouches d'armes portatives (laboratoire BRGM)

Libélé	Nature	Facteur liquide / solide	ClO_3^-	ClO_4^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	NH_4+NO_3	Cl^-	SO_4^{2-}	PO_4^-	F^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Fe	Silice	Na / ClO_3	NH_4/ClO_4	K/ClO_4
		L/Kg	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mmol/mmol	mmol/mmol	mmol/mmol
M1	Poudre / paillettes nitrocellulosiques de cartouche allemande de 7,8 mm Mauser		< 0,1	**89,3**	36,0	-	1,05	37,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2			< 0,1	**51,6**	29,2	-	1,77	30,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3			**1,3622**	**2084,1**	1024,9	-	8,37	1033,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M4			**12,4775**	**6488,3**	352,0	-	2,23	354,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M5			< 0,1	**78,3**	72,1	-	3,76	75,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M6			**3,5314**	**317,8**	208,9	-	2,26	211,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M7		10,46	0,30	**121**	43,3	36,2	< 0,5	36,20	8,0	9,9	< 0,5	< 0,10	24,7	12,9	3,1	104	2,2	4,9	156,0	-	882,1
M8		11,27	0,20	**380**	52,3	22,2	< 0,5	22,20	31,9	49,2	< 0,5	< 0,10	30,2	13,1	1,9	86,8	0,7	3,8	237,7	-	1104,3
M9		10,33	0,70	**413**	141	50,6	5,3	146,30	108	98,0	< 0,5	< 0,10	175	7,7	3,7	41,1	0,4	3,8	39,9	70,9	149,4
M10		10,09	0,04	**524**	25,7	16,7	< 0,5	16,70	6,5	17,9	< 0,5	< 0,10	15,6	4,1	1,5	29,7	1,9	3,8	-	-	-
M11		10,11	0,05	**329**	122	32,3	5,9	127,90	18,4	20,4	< 0,5	< 0,10	20,0	9,7	1,8	79,9	0,7	4,5	-	99,1	-
M12		10,24	**2,40**	**632**	262	69,9	11,2	273,20	28,9	70,8	< 0,5	< 0,10	17,7	15,4	1,9	497	3,8	3,3	23,3	97,9	526,9
"Poudre B"	Poudre / paillettes nitrocellulosiques de cartouche française de 8 mm Lebel Mdl 1886		0,157	< 5	112,0	-	2,00	114,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEB2		10,35	0,5	**38,3**	55,2	22,0	< 0,5	22,00	5,0	5,5	< 0,5	< 0,10	36,2	5,3	2,2	< 1,0	< 0,20	8,6	38,5	-	-

ANNEXE B

Résultats des analyses des isotopes stables O, Cl des ions perchlorate (laboratoire Université du Delaware, USA) et N, O des ions nitrates (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble) dans les échantillons d'ergols solides et d'explosifs

Libélé	Typologie	NO_3^-								ClO_4		
		$d^{17}O$	$d^{18}O$	$D^{17}O$	$d^{15}N$	$d^{17}Oerr$	$d^{18}Oerr$	$D^{17}Oerr$	$d^{15}Nerr$	$d^{18}O$	$D^{17}O$	$d^{37}Cl$
M1	Paillettes nitrocellulosique de cartouche de 7 mm Mauser, Allemagne	-1,05	-3,33	0,69	4,06	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
M2		-1,14	-3,42	0,64	4,81	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
M4		1,43	2,19	0,29	12,56	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
M5		-0,21	-1,39	0,51	8,56	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
M6		1,82	1,96	0,80	7,72	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
M7		-1,97	-4,88	0,56	6,09	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
M8		4,84	8,23	0,56	10,53	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
M9		1,97	2,63	0,60	9,63	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
M10		1,90	2,93	0,38	5,80	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
M11		3,77	5,60	0,85	6,48	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
M12		2,58	3,18	0,92	13,06	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
GAM V0	Grenades à mache fusante allemande	3,47	5,99	0,35	14,35	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
GAM V01		0,70	-0,34	0,87	9,53	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
GAM V02		1,82	2,88	0,32	18,90	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
GAM V1		6,03	11,93	-0,17	15,94	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
GAM V2		1,83	3,26	0,14	18,01	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
GAM V3		-0,75	-2,04	0,31	12,72	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
GAM V4		-7,36	-14,55	0,21	9,97	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
GAM VAU 1		-0,89	-1,62	-0,05	13,75	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
GAM VAU 2		-7,65	-14,81	0,05	12,25	1,09	1,79	0,22	0,38	-	-	-
GAM VAU 3		4,35	7,99	0,19	7,15	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
GAM VAU 4		-7,16	-13,62	-0,07	12,37	1,09	1,79	0,22	0,38	-	-	-
GAM1		6,24	8,66	**1,73**	7,96	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
GAM2		1,55	2,60	0,19	10,12	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
GAM3		-1,83	-5,82	**1,19**	-16,47	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
COR GAM 1		11,85	22,44	0,18	18,44	0,96	1,47	0,28	0,25	-	-	-
COR GAM 2		5,26	9,01	0,57	10,48	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
HG3		-	-	-	-	-	-	-	-	-17,2	0,2	1,5
EXP CONT: explosive of 105 mm german shell		8,81	17,43	-0,26	22,62	1,37	2,38	0,38	0,96	-	-	-
TNT1		10,60	20,08	0,16	42,12	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
TNT2		11,11	17,95	**1,78**	5,77	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
TNT3		7,63	13,12	0,81	17,07	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
TNT4		-6,65	-13,50	0,37	16,11	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
TNT5		17,41	24,33	**4,76**	4,14	0,53	0,82	0,24	1,19	-	-	-
TNT7		1,93	2,74	0,50	3,90	0,53	0,82	0,24	1,19	-	-	-
DNB1, dinitrobenzène, Allemagne.		5,89	10,66	0,35	12,07	0,53	0,82	0,24	1,19	-	-	-
TNN1		8,87	16,60	0,23	7,57	0,59	1,12	0,16	1,21	-	-	-
RAD résidus de pains d'explosif, Raderstollen, Vauquois.	Charge de fourneaux de mine, explosifs de sureté	3,48	6,44	0,13	8,35	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
Donarite (Fille morte). Explosif nitré nitraté de sureté allemand.		5,06	8,19	0,80	4,62	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-
Perdite 1		-	-	-	-	-	-	-	-	-14,4	0,2	1,5
Perdite 2		-	-	-	-	-	-	-	-	-15,4	0,2	0,2
Dynamite - gomme française		0,54	-2,48	**1,83**	-13,17	1,19	1,97	0,37	0,68	-	-	-
Westphalite. Explosif nitré nitraté de sureté allemand.		-5,74	-14,22	**1,65**	-22,19	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
Donarite BDC. Explosif nitré nitraté de sureté allemand.		8,87	11,53	**2,88**	-0,12	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
58T	Explosif perchlorate de bombe de tranchée française	17,27	25,10	**4,22**	-8,27	1,10	1,77	0,37	0,54	-19,3	0	1
MAG	Explosif nitré nitraté de bombe de tranchée allemande "Maganer"	-0,97	-6,46	**2,39**	-10,53	0,83	1,16	0,35	0,12	-	-	-
FOUR S'	Résidus de charge de déstruction, galerie française S', Vauquois.	0,75	0,26	0,62	-0,58	1,10	1,77	0,37	0,54	-	-	-

ANNEXE C

Préparation du chantier de sondages à la pelle mécanique au droit de deux sites du complexe de désobusage industriel Clere & Schwander du canton de Spincourt (2018)

Le chantier de sondage à la pelle mécanique fut organisé comme suit à Rampont (commune de Muzeray) et Noire Fontaine (commune de Vaudoncourt).

La première étape fut la détermination, par le Service du Déminage (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, DGSCGC, centre de Metz), d'une zone d'effet en cas d'explosion accidentelle d'un engin en considérant, sur la base de l'étude historique, l'obus français explosif de 155 mm comme chef de famille (projectile de référence). La zone d'effet a permis de délimiter un périmètre d'interdiction d'un rayon de 800 m centré sur le chantier. Le BRGM fit appel à une société de gardiennage pour la surveillance des barrières posées à chaque chemin et voirie recoupée par le périmètre d'interdiction. Le périmètre fut imposé durant toutes les actions de creusement. Les propriétaires et exploitants agricoles dont les parcelles étaient incluses ou recoupées par le périmètre furent informés par arrêté municipal de l'obligation d'absence des personnes sur ces parcelles durant les travaux. Après accord des exploitants et propriétaires des parcelles visées par les sondages, la Préfecture de la Meuse notifia par l'Arrêté Préfectoral du 26 janvier 2017 « *portant autorisation de pénétrer et d'occuper temporairement des propriétés privées* », au titre de la Loi du 29 décembre 1892 relative aux dommages causés à la propriété privée par l'exécution de travaux publics, l'autorisation d'engager les travaux. De tels périmètres d'exclusion furent aussi mis en place pour les investigations opérées sur les terrains d'explosion en Bavière comme Illesheim (rayon de 500 m)[2122].

Une base vie comprenant une roulotte de chantier et une équipe du SDISS 55, spécialisée en intervention sur pollutions chimiques, fut constituée sur les deux sites investigués, à l'extérieur du périmètre d'interdiction. Ces personnels étaient en relation avec le BRGM et les vigiles par talkie-walkie. Une équipe de 10 vigiles (et un responsable d'équipe) fut mobilisée durant la période des travaux. Les acteurs parties prenantes dans la sécurité du chantier étaient placés sous la coordination d'une Coordinateur Sécurité Pyrotechnique.

Les avis des CHSCT du BRGM et de la société de gardiennage, sous-traitante du BRGM (société VERITAS), furent requis préalablement aux opérations. Le CHSCT du BRGM donna un avis favorable à l'EST par un courrier daté du 28 septembre 2017. L'organisation du chantier, prévue par l'EST fut *in fine* modifiée, ces modifications conduisant à une rehausse des mesures de sécurité individuelles et collectives.

Plus d'un an aura été nécessaire afin de parfaire, instruire les demandes d'intervention sur les sites de Rampont et de Noire Fontaine avec les différents services compétents de l'Etat (DIRECCTE, IPE, etc.) pour pouvoir investiguer en toute sécurité ces sites doublement dangereux, dans le respect d'une double réglementation, celle applicable aux sites et sols pollués (et ses risques toxiques) et celle aux sites pyrotechniques (et ses risques d'incendie et d'explosion).

Sur le plan opérationnel, le creusement s'effectua au moyen d'une pelle mécanique de 20 tonnes pilotée par un opérateur de CARDEM-Pyro placé sous la direction de personnel du Centre de Déminage de Metz. Une équipe de cinq démineurs, placée sous la responsabilité du Chef de Centre du déminage de Metz, fut mobilisée durant les travaux. Les démineurs se chargèrent de l'inspection visuelle et des détections géomagnétiques à l'avancement.

Durant la phase de creusement, les personnels n'appartenant pas au Déminage quittèrent le périmètre de sécurité et se replièrent sur la base vie, en attente des instructions des démineurs. Les personnels du BRGM regagnèrent le chantier au feu vert des démineurs, une fois la phase de creusement achevée. Afin de se prémunir des risques d'effondrement (les fouilles n'étant pas étayées), un périmètre fut matérialisé par un piquetage et un marquage à la rubalise, à 1,5 m des bords des fouilles ; la présence de personnels était interdite dans ce périmètre.

En cas de découverte d'engins de guerre, le creusement aurait été immédiatement arrêté dans l'attente du retrait, de l'identification, puis de la mise en sécurité des engins.

[2122] *Schwendner, A. (2009), LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH. Bayerisches Landesamt für Umwelt (September 2009) Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil.*

On perçoit ici, avec l'énoncé de ces contraintes, le caractère exceptionnel de ces investigations, complexes, potentiellement à risques, chronophages, et la haute valeur ajoutée scientifique et technique des observations et des résultats qui en découlent, en ce qui concerne la connaissance de la typologie des terrains de brûlage de munitions de l'entre-deux-guerres.

ANNEXE D

Echantillonnage réalisé et méthodes analytiques appliquées dans le cadre de la caractérisation des sols et des résidus des terrains de destruction des Restes Explosifs de Guerre par brûlage (*Open Burning*)

Caractérisation de la qualité des sols de surface sur matériel brut

Eléments, composés ou famille de composés	Famille	Nature, origine	Méthode, laboratoire	Clere & Schwander, Spincourt				"Place à gaz", F.N. Pickett & Fils		*C-Factory*, F.N. Pickett & Fils			*B-Factory*, F.N. Pickett & Fils	Conteville, F.N. Pickett & Fils	Total
				Noire Fontaine (total)	Noire Fontaine (terrain d'explosion, auréole de projection)	Noire Fontaine (terrains de brûlage, ateliers de déchargement)	Rampont	(aire centrale)	(aire nord)	Trélon Parc Jeannette 1	Trélon Parc Jeannette 2	Liessies, Bois l'Abbé	Westroozebeke, Conterdreef	Bois Brûlé	
Aluminium (Al)	Eléments traces métalliques	Métal (fusée, etc.)	ICP-OES/ICP-MS. DIN EN ISO 11885 / DIN EN ISO 17294-2(A). Wessling.	0	0	0	0	0	0	4	3	3	0	0	10
Arsenic (As)		Métalloïde (arsines, fusées, agents fumigènes, etc.)		104	20	84	48	26	2	8	8	14	3	4	217
Antimoine (Sb)		Métal (balles de Shrapnel, etc.)		0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4
Chrome total (Cr)		Métal		0	0	0	0	11	2	4	5	3	0	2	27
Cadmium (Cd)		Métal (fusées)		104	20	84	48	26	2	8	8	9	3	4	212
Cuivre (Cu)		Métal (fusées, ceintures, cartouches, etc.)		43	6	37	12	19	2	8	8	9	3	4	108
Mercure total (Hg)		Métal (amorces au fulminate de mercure)	DIN ISO 16772(A). Wessling	90	20	70	48	22	2	4	3	6	3	4	182
Nickel (Ni)		Métal	ICP-OES/ICP-MS. DIN EN ISO 11885 / DIN EN ISO 17294-2(A). Wessling.	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	2	8
Plomb (Pb)		Métal (réservoirs munitions chimiques, balles de Shrapnels, etc.)		98	20	78	48	26	2	8	8	14	3	4	211
Etain (Sn)		Métal (obus étamés, agents fumigènes)		96	20	76	48	26	2	8	8	9	3	4	204
Zinc (Zn)		Métal (fusées, ceintures)		104	20	84	48	0	0	8	8	14	3	4	189
HAP (16 HAP US EPA)	**HAP**	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique	NF ISO 18287 (A), Wessling	17	6	11	7	18	0	0	0	0	0		42
PCDD & PCDF	**Dioxines & Furanes**	Dioxines et furanes chlorées (combustion)	DIN 38414 S24(A). Laboratoire Wessling	19	1	18	13	13	1	2	6	6	3		63
PCB- *Dioxin Like*		*PCB-Dioxin like* chlorés (combustion)	US EPA. 1613 mod.(A), Wessling	0	0	0	6	1	0	0	0	0	0		7
PBDD & PBDF		Dioxines et furanes bromées (combustion)	GC/MS, Dioxlab	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		1
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Composés nitroaromatiques apolaires	Métabolite du TNT	ISO 11916-1, laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne	10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
4-Amino-2,6-dinitrotoluène		Métabolite du TNT		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
4-Amino-2-nitrotoluène		Métabolite du DNT		0	0	0	1	0	1	0	0	11	3	2	18
2,4-Dinitrotoluène		Explosif, impureté du TNT		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
2,6-Dinitrotoluène		Explosif, impureté du TNT		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT)		Explosif, *Tolite*		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
1,2-Dinitrobenzène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,3-Dinitrobenzène		Explosif		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
1,3,5-Trinitrobenzène		Impureté du TNT		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
2-Nitroaniline		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
3-Nitroaniline		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
3,5-Dinitroaniline		Explosif		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
1-Nitronaphthalène		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
2-Nitronaphthalène		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,3-Dinitronaphthalène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,5-Dinitronaphthalène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,8-Dinitronaphthalène		Explosif		10	0	10	1	0	1	2	6	11	3	2	36
1,3,5-Trinitronaphthalène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,3,8-Trinitronaphthalène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
1,4,5-Trinitronaphthalène		Explosif		0	0	0	1	0	1	2	6	11	3	2	26
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	Composés nitroaromatiques polaires	Sous-produit du TNT	HPLC-DAD / KORA - TV 5 (2008), Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Acide 2,4-Dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Acide 2,6-Dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
2-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
3-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
4-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
2,4-Dinitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
2,6-Dinitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
2,4,6-Trinitrophénol		Explosif (*Mélinite*)		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Bis(2-hydroxyethyl) sulfure	Impuretés et sous-produits de transformation des *Ypérites*	Sous-produit de l'*Ypérite*	EI-GC/MS, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Bis(2-hydroxyethyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Acide 2,2´-Thiodiacétique		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Bis(2-chloroéthyl) sulfure		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Bis(2-chloroéthyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Bis(2-chloroéthyl) sulfoxyde		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Bis(2-hydroxyéthyl) sulfide		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Bis(2-hydroxyéthyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
1,4-Dithiane		Impureté de l'*Ypérite*		4	0	4	13	20	0	0	0	0	0	0	37
1,4-Oxathiane		Impureté de l'*Ypérite*		4	0	4	13	20	0	0	0	0	0	0	37
1-Oxa-4,5-dithiepane		Impureté de l'*Ypérite*		4	0	4	13	0	0	0	0	0	0	0	17
1,2,5-Trithiepane		Impureté de l'*Ypérite*		4	0	4	13	0	0	0	0	0	0	0	17
Chlorure de Diphénylarsine	Arsines et sous-produits dérivés	Clark 1, arsine vomitive		33	6	27	24	20	0	0	0	0	0	0	77
Cyanure de Diphénylarsine		Clark 2, arsine vomitive		33	6	27	24	20	0	0	0	0	0	0	77
(Biphenyl-4-yl)diphénylarsine		Sous-produit de décomposition thermique des arsines		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
9-Phénylarsafluorène		Sous-produit de décomposition thermique des arsines		0	0	0	0	20	0	0	0	0	3	2	25
Triphénylarsine		Sous-produit de décomposition thermique des arsines		37	6	31	1	20	0	0	0	0	3	2	63
Acide diphénylarsinique		Sous-produit d'oxydation des arsines		10	0	10	29	0	0	0	0	0	3	2	44
Composés ethyarséniés		Arsines vomitives		0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Composés diphénylarséniés		Arsines vomitives		0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Bromure de o-Xylyle	Agents lacrymogènes halogénés et intermédiaires	Agents bromés lacrymogènes	OPCW ROP 2011, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Bromure de m-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Bromure de p-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Dibromure de o-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Dibromure de m-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Dibromure de p-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Bromoforme		Solvant		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
2-Bromotoluène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
4-Bromotoluène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
2-Bromo-p-xylène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
2,5-Dibromo-p-xylène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Bromure de Benzyl		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Ethyliodoacétate		Agents iodés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Iodoacétone		Agents iodés lacrymogènes		0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
Chlorobenzène	**Solvants**	Solvant de l'*Ypérite*		37	6	31	13	15	0	0	0	0	0	0	65
Tetrabromométhane		Solvant		0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	8
Tetryl	**Explosif**	Explosif	DIN ISO 11916-1: 2014-11, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Centralites (I, II)	**Stabilisants**	Stabilisant des ergols		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Akardites (I, II)		Stabilisant des ergols		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Diphénylamine		Stabilisant des ergols		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
TOTAL	-	-	-	**921**	**157**	**764**	**508**	**702**	**48**	**100**	**179**	**307**	**93**	**86**	**2944**

Eléments, composés ou famille de composés	Famille	Méthode, laboratoire	*D-Factory*, Westroozebeke		*E-Factory*, Audruicq	Total
			Nombre d'échantillons Usine	Nombre d'échantillons *Burning Ground*	Nombre d'échantillons *Burning Ground*	
Arsenic (As)	Métaux et métalloïdes	DIN 1993. Envilytix GmbH, Bausinger, 2005	13	7	22	42
Cuivre (Cu)		F-AAS (DIN 1997) Envilytix GmbH, Bausinger, 2005	13	7	22	42
Cadmium (Cd)			0	0	22	22
Plomb (Pb)			13	7	22	42
Zinc (Zn)			0	0	22	22
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Composés nitroaromatiques polaires	HPLC - DAD. Envilytix GmbH, Allemagne	0	6	22	28
4-Amino-2,6-dinitrotoluène			0	6	22	28
2-Amino-6-Nitrotoluène			0	0	22	22
2-Amino-4-Nitrotoluène			0	0	22	22
4-Amino-2-Nitrotoluène			0	0	22	22
2,4-Diamino-nitrotoluène			0	0	22	22
2,6-Diamino-nitrotoluène			0	0	22	22
2,4-Dinitrotoluène			0	6	22	28
2,6-Dinitrotoluène			0	0	22	22
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT, *Tolite*)			0	6	22	28
1,2-Dinitrobenzène			0	6	22	28
1,3-Dinitrobenzène			0	6	22	28
3,5-Dinitroaniline			0	0	22	22
1,3,5-Trinitrobenzène			0	6	22	28
2-Nitroaniline			0	6	22	28
3-Nitroaniline			0	6	22	28
4-Nitroaniline			0	0	22	22
1-Nitronaphthalène			0	6	22	28
2-Nitronaphthalène			0	0	22	22
1,3-Dinitronaphthalène			0	6	22	28
1,5-Dinitronaphthalène			0	6	22	28
1,8-Dinitronaphthalène			0	6	22	28
1,3,5-Trinitronaphthalène			0	6	22	28
1,3,8-Trinitronaphthalène			0	6	22	28
1,4,5-Trinitronaphthalène			0	6	22	28
Oxyde de Bis(phényl)arsine	Dérivés des arsines	Méthodes internes. Extraction par ultrasons avec méthanol, puis GC/MS (triphénylarsine et 9-phenylarsafluorène) et HPLC-DAD (acide diphenylarsinique). laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne	0	6	0	6
p-phénylène-bis-diphénylarsine			0	6	0	6
Triphénylarsine			0	6	0	6
9-phenylfluorène			0	6	0	6
Total	**-**	**-**	**39**	**141**	**660**	**840**

Caractérisation de la qualité des sols en profondeur sur matériel brut

Eléments, composés ou famille de composés	Famille	Nature, origine	Méthode, laboratoire	Clere & Schwander, Spincourt				"Place à gaz", F.N. Pickett & Fils		Total
				Noire Fontaine (total)	Noire Fontaine (terrain d'explosion, auréole de projection)	Noire Fontaine (terrains de brûlage, ateliers de déchargement)	Rampont	(aire centrale)	(aire nord)	
Aluminium (Al)	Eléments traces métalliques	Métal (fusée, etc.)	ICP-OES/ICP-MS. DIN EN ISO 11885 / DIN EN ISO 17294-2(A). Wessling.	0	0	0	0	0	0	0
Arsenic (As)		Métalloïde (arsines, fusées, agents fumigènes, etc.)		32	0	32	20	36	2	90
Antimoine (Sb)		Métal (balles de Shrapnel, etc.)		0	0	0	0	0	0	0
Chrome total (Cr)		Métal		0	0	0	0	13	2	15
Cadmium (Cd)		Métal (fusées)		32	0	32	20	13	2	67
Cuivre (Cu)		Métal (fusées, ceintures, cartouches, etc.)		32	0	32	20	13	2	67
Mercure total (Hg)		Métal (amorces au fulminate de mercure)	DIN ISO 16772(A). Wessling	32	0	32	20	13	2	67
Nickel (Ni)		Métal	ICP-OES/ICP-MS. DIN EN ISO 11885 / DIN EN ISO 17294-2(A). Wessling.	0	0	0	0	13	2	15
Plomb (Pb)		Métal (réservoirs munitions chimiques, balles de Shrapnels, etc.)		32	0	32	20	36	2	90
Etain (Sn)		Métal (obus étamés, agents fumigènes)		32	0	32	20	0	0	52
Zinc (Zn)		Métal (fusées, ceintures)		32	0	32	20	36	2	90
HAP (16 HAP US EPA)	**HAP**	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique	NF ISO 18287 (A), Wessling	0	0	0	0	0	0	0
PCDD & PCDF	**Dioxines & Furanes**	Dioxines et furanes chlorées (combustion)	DIN 38414 S24(A). Laboratoire Wessling	14	0	14	7	6	1	28
PCB- *Dioxin Like*		PCB-Dioxin like chlorés (combustion)	US EPA. 1613 mod.(A), Wessling	0	0	0	0	0	0	0
PBDD & PBDF		Dioxines et furanes bromées (combustion)	GC/MS, Dioxlab	0	0	0	0	0	0	0
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Composés nitroaromatiques apolaires	Métabolite du TNT	ISO 11916-1, laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne	13	0	13	6	8	1	28
4-Amino-2,6-dinitrotoluène		Métabolite du TNT		13	0	13	6	8	1	28
4-Amino-2-nitrotoluène		Métabolite du DNT		13	0	13	6	0	0	19
2,4-Dinitrotoluène		Explosif, impureté du TNT		13	0	13	6	0	0	19
2,6-Dinitrotoluène		Explosif, impureté du TNT		13	0	13	6	0	0	19
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT)		Explosif, *Tolite*		13	0	13	6	8	1	28
1,2-Dinitrobenzène		Explosif		13	0	13	6	0	0	19
1,3-Dinitrobenzène		Explosif		13	0	13	6	8	1	28
1,3,5-Trinitrobenzène		Impureté du TNT		13	0	13	6	0	0	19
2-Nitroaniline		Intermédiaire de production		13	0	13	6	0	0	19
3-Nitroaniline		Intermédiaire de production		13	0	13	6	0	0	19
3,5-Dinitroaniline		Explosif		13	0	13	6	0	0	19
1-Nitronaphthalène		Intermédiaire de production		13	0	13	6	0	0	19
2-Nitronaphthalène		Intermédiaire de production		13	0	13	6	0	0	19
1,3-Dinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	8	1	28
1,5-Dinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	8	1	28
1,8-Dinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	0	0	19
1,3,5-Trinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	0	0	19
1,3,8-Trinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	8	1	28
1,4,5-Trinitronaphthalène		Explosif		13	0	13	6	8	1	28
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	Composés nitroaromatiques polaires	Sous-produit du TNT	KORA - TV 5 (2008), Envilytix GmbH, Allemagne	13	0	13	6	8	1	28
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		13	0	13	6	8	1	28
Acide 2,4-Dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		13	0	13	6	0	0	19
Acide 2,6-Dinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		13	0	13	6	0	0	19
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque		Sous-produit du TNT		13	0	13	6	0	0	19
2-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	0	0	0	0
3-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	0	0	0	0
4-Nitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	0	0	0	0
2,4-Dinitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	0	0	0	0
2,6-Dinitrophénol		Intermédiaire de production		0	0	0	0	0	0	0
3,4-Dinitrophénol		Intermédiaire de production		13	0	13	6	0	0	19
2,4,6-Trinitrophénol		Explosif (*Mélinite*)		13	0	13	6	8	1	28
Bis(2-hydroxyethyl) sulfure	Impuretés et sous-produits de transformation des *Ypérites*	Sous-produit de l'*Ypérite*	EI-GC/MS, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-hydroxyethyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Acide 2,2´-Thiodiacétique		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-chloroéthyl) sulfure		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-chloroéthyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-chloroéthyl) sulfoxyde		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-hydroxyéthyl) sulfide		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
Bis(2-hydroxyéthyl) sulfone		Sous-produit de l'*Ypérite*		0	0	0	0	0	0	0
1,4-Dithiane		Impureté de l'*Ypérite*		0	0	0	6	0	0	6
1,4-Oxathiane		Impureté de l'*Ypérite*		0	0	0	6	0	0	6
1-Oxa-4,5-dithiepane		Impureté de l'*Ypérite*		0	0	0	6	0	0	6
1,2,5-Trithiepane		Impureté de l'*Ypérite*		0	0	0	6	0	0	6
Chlorure de Diphénylarsine	Arsines et sous-produits dérivés	Clark 1, arsine vomitive		13	0	13	6	8	1	28
Cyanure de Diphénylarsine		Clark 2, arsine vomitive		13	0	13	6	0	0	19
(Biphenyl-4-yl)diphénylarsine		Sous-produit de décomposition thermique des arsines			0	0		8	1	9
9-Phénylarsafluorène		Sous-produit de décomposition thermique des arsines		13	0	13	6	8	1	28
Triphénylarsine		Sous-produit de décomposition thermique des arsines		13	0	13	6	8	1	28
Acide diphénylarsinique		Sous-produit d'oxydation des arsines	KORA - TV 5 (2008), Envilytix GmbH, Allemagne	13	0	13	6	8	1	28
Composés ethyarséniés		Arsines vomitives	EI-GC/MS, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	0	0	0
Composés diphénylarséniés		Arsines vomitives		0	0	0	0	0	0	0
Bromure de o-Xylyle	Agents lacrymogènes halogénés et intermédiaires	Agents bromés lacrymogènes	OPCW (2017), Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	0	0	0
Bromure de m-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Bromure de p-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Dibromure de o-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Dibromure de m-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Dibromure de p-Xylyle		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Bromoforme		Solvant		0	0	0	0	0	0	0
2-Bromotoluène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	8	1	9
4-Bromotoluène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	8	1	9
2-Bromo-p-xylène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	8	1	9
2,5-Dibromo-p-xylène		Intermédiaire de production		0	0	0	0	8	1	9
Bromure de Benzyl		Agents bromés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Ethyliodoacétate		Agents iodés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
Iodoacétone		Agents iodés lacrymogènes		0	0	0	0	0	0	0
N-ethylcarbazole	**Irritant**	Toxique irritant		13	0	13	6	0	0	19
Chlorobenzène	**Solvants**	Solvant de l'*Ypérite*		13	0	13	6	8	1	28
Tetrabromométhane		Solvant		0	0	0	0	0	0	0
Tetryl	**Explosif**	Explosif	DIN ISO 11916-1: 2014-11, Envilytix GmbH, Allemagne	0	0	0	0	0	0	0
Centralite 1 (1,3-diéthyl-1,3-diphenylurée)	**Stabilisants**	Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	19
Centralite 2		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	0
Centralite 3		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	0
Akardite 1 (1,1-Diphénylurée)		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	0
Akardite 2 (3-Méthyl-1,1-diphénylurée)		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	0
Akardite 3		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	0
Diphénylamine		Stabilisant des ergols		13	0	13	6	0	0	19
TOTAL	-	-	-	771	0	771	417	347	38	**1573**

Caractérisation de la qualité des sols de surface sur lixiviat

Eléments, composés ou famille de composés	Famille	Méthode, laboratoire	Clere & Schwander, Spincourt				"Place à gaz", F.N. Pickett & Fils		*C-Factory,* F.N. Pickett & Fils			*B-Factory* , F.N. Pickett & Fils	Conteville, F.N. Pickett & Fils	Total
			Noire Fontaine (total)	Noire Fontaine (terrain d'explosion, auréole de projection)	Noire Fontaine (terrains de brûlage, ateliers de déchargement)	Rampont	(aire centrale)	(aire nord)	Trélon Parc Jeannette 1	Trélon Parc Jeannette 2	Liessies, Bois l'Abbé	Westroozebeke, Conterdreef	Bois Brûlé	
Arsenic (As)	Métalloïde	ICP-MS suivant NF EN ISO 17294-2. BRGM	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Zinc (Zn)	Métal		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Brome (Br)	Halogènes	Méthode par chromatographie ionique (Dionex) selon NF EN ISO 10304- 1 (juillet 2009). Evaluation des aires des pics. Analyse sur échantillon filtré à 0,45 µm. BRGM	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Chlorure (Cl^-)			0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
Iodure (I^-)			0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
ClO_3^- (Chlorates)	Oxyanions	GC - GC - MS, méthode interne. BRGM	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	7
ClO_4^- (Perchlorate)			0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	7
NO_3^- (Nitrates exprimés en NO3)			0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	7
SO_4^{2-} (Sulfates)			0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
NH_4^+ (Ammonium exprimé en NH4)	Ammonium	Analyse en flux(FFA et FIA) et détection spectrométrique. BRGM	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	7
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	Nitrotoluènes, nitroaromatiques apolaires	HPLC-DAD, laboratoire Envilytix GmbH, Allemagne / KORA - TV 5 (2008), Envilytix GmbH, Allemagne	52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
4-Amino-2,6-dinitrotoluène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
4-Amino-2-nitrotoluène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
2,4-Dinitrotoluène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
2,6-Dinitrotoluène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
2,4,6-Trinitrotoluène (TNT)			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,2-Dinitrobenzène	Nitrobenzènes, nitroaromatiques apolaires		52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,3-Dinitrobenzène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,3,5-Trinitrobenzène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
2-Nitroaniline	Nitroanilines, nitroaromatiques apolaires		52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
3-Nitroaniline			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
3,5-Dinitroaniline			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1-Nitronaphthalène	Nitronaphtalènes, nitroaromatiques apolaires		52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
2-Nitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,3-Dinitronaphthaleène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,5-Dinitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,8-Dinitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,3,5-Trinitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,3,8-Trinitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
1,4,5-Trinitronaphthalène			52	14	38	13	20	0	0	0	0	0	0	137
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	Métabolites et sous produits des nitrotoluènes et nitrobenzènes		24	6	18	13	20	0	0	0	0	0	0	81
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque			24	6	18	13	20	0	0	0	0	0	0	81
Acide 2,4-Dinitrobenzoïque			24	6	18	13	20	0	0	0	0	0	0	81
Acide 2,6-Dinitrobenzoïque			24	6	18	13	20	0	0	0	0	0	0	81
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque			24	6	18	13	20	0	0	0	0	0	0	81
2-Nitrophénol	Nitrophénols, nitroaromatiques polaires		19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
3-Nitrophénol			19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
4-Nitrophénol			19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
2,4-Dinitrophénol			19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
2,6-Dinitrophénol			19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
2,4,6-Trinitrophénol			19	6	13	13	20	0	0	0	0	0	0	71
N-Ethyl-N-phenyluréthane	Phénylamines et phénylurées (stabilisants)		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Diphénylamine			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
N,N-Diphényluréthane			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
N,N-Diphénylurée			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
N-Methyl-N´,N´-diphenylurée			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
N,N´-Diethyl-N,N´-diphénylurée			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
N,N´-Dimethyl-N,N´-diphénylurée			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
2-Nitrodiphénylamine	Explosifs nitrophénylamines		0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
4-Nitrodiphénylamine			0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Acide diphénylarsinique	Sous produit d'oxydation des diphénylarsines		48	10	38	13	15	0	0	0	0	0	0	124
Total	-	-	1322	356	966	416	860	0	0	0	0	0	10	**3930**

ANNEXE E

Jeu de données de teneurs en métaux et métalloïdes retenu pour le traitement statistique par Analyse en Composante Principale (ACP)

Données visant quatre éléments et sept sites de brûlage

Libéllé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Nature de l'échantillon	Site	Arsenic (As)	Cadmium (Cd)	Plomb (Pb)	Zinc (Zn)	Unité
SPIN 01	41 744	Surface [0- 5cm]	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	4 400	6,00	143 922	2 219	mg/kg MS
RESIDU 01	41 744	-	Déchets résineux, fosse 1	Place à gaz, fosse	1 124	3,00	24 149	512	mg/kg MS
SPIN01-2 (0,2)	41 800	0	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	5 300	4,00	38 000	1 900	mg/kg MS
SPIN01-3 (0,2)	41 800	0	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	1 900	1,10	35 000	430	mg/kg MS
F1-3 (0,01-0,09)	41 800	[0,01-0,09]	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	6 700	7,20	33 000	3 700	mg/kg MS
F1-8(0,15)	41 800	0	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	2 400	1,20	31 000	960	mg/kg MS
F1-9 (0,15-0,2)	41 800	[0,15-0,2]	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	5 800	6,60	33 000	3 200	mg/kg MS
F1-10 (0,15-0,25)	41 800	[0,15-0,25]	Déchets de combustion, fosse 1	Place à gaz, fosse	4 000	1,80	33 000	860	mg/kg MS
SPM06-0.2m	41 934	0	Tache centrale, profils	Place à gaz	11 000	25,00	50 000	5 300	mg/kg MS
SPIN02	41 744	Surface [0- 5cm]	Sols et déchets de combustion	Place à gaz	9 436	80,00	2 357	30 836	mg/kg MS
SPIN03	41 744	Surface [0- 5cm]	Déchets de combustion riche en métaux	Place à gaz	7 660	31,00	2 496	12 720	mg/kg MS
D8	41 935	Surface [0- 5cm]	Dépôt Nord, sols de surface	Place à gaz	8 800	64,00	2 000	54 000	mg/kg MS
D9	41 935	Surface [0- 5cm]	Dépôt Nord, sols de surface	Place à gaz	9 800	170,00	6 500	130 000	mg/kg MS
SPM07-0.2m	41 935	0	Dépôt Nord, profils	Place à gaz	980	19,00	2 600	13 000	mg/kg MS
P39	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	110 000	160,00	8 200	59 000	mg/kg MS
TC1	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	18 000	52,00	4 600	28 000	mg/kg MS
TC2	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	18 000	47,00	16 000	26 000	mg/kg MS
TC3	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	6 400	36,00	1 500	15 000	mg/kg MS
TC4	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	49 000	140,00	5 500	64 000	mg/kg MS
TC5	41 800	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	Place à gaz	120 000	150,00	8 600	73 000	mg/kg MS
SPM05-0.2m	41 934	0	Tache centrale, profils	Place à gaz	23 000	96,00	4 200	55 000	mg/kg MS
A3	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	Place à gaz	180	1,00	200	470	mg/kg MS
A11	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	Place à gaz	130	1,20	130	560	mg/kg MS
A13	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	Place à gaz	110	0,60	59	390	mg/kg MS
A18	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	Place à gaz	350	1,10	130	570	mg/kg MS
B5	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	Place à gaz	59	0,50	39	260	mg/kg MS
C1 bis	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	Place à gaz	590	1,20	120	500	mg/kg MS
C9bis	41 800	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	Place à gaz	800	3,90	380	3 000	mg/kg MS
D8	41 913	Surface [0- 5cm]	Dépôt nord	Place à gaz	8 800	64,00	2 000	54 000	mg/kg MS
D9	41 913	Surface [0- 5cm]	Dépôt nord	Place à gaz	9 800	170,00	6 500	130 000	mg/kg MS
SPM07-0.2m	41 913	0	Dépôt nord	Place à gaz	980	19,00	2 600	13 000	mg/kg MS
NF-AT-6	42 186	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	410	3,90	67	3 000	mg/kg MS
NF-AT-7	42 186	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	620	2,20	70	1 300	mg/kg MS
NF-AT-8	42 186	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	580	4,50	110	3 800	mg/kg MS
NF-AT-11	42 186	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	190	1,10	120	380	mg/kg MS
NF-A	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	200	0,40	46	260	mg/kg MS
NF-B	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	180	0,50	200	300	mg/kg MS
NF-H	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	120	0,30	42	130	mg/kg MS
NF-I	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	190	0,40	43	200	mg/kg MS
NF-J	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	120	0,50	33	230	mg/kg MS
NF-K	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	74	0,50	30	250	mg/kg MS
NF-L	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	120	0,40	32	180	mg/kg MS
NF-M	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	150	0,40	37	200	mg/kg MS
NF-P	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	640	0,30	53	150	mg/kg MS
NF-Z	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	82	0,30	71	210	mg/kg MS
NF-AA	42 675	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	Noire Fontaine	63	0,30	29	170	mg/kg MS
MUZ-T4-1	42 186	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	78	8,00	150	6 900	mg/kg MS
MUZ-T4-2	42 186	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	280	17,00	240	13 000	mg/kg MS
MUZ-CHEMIN	42 186	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	25	0,90	41	440	mg/kg MS
M.26	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	28	0,60	27	370	mg/kg MS
M.27	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	35	0,70	24	340	mg/kg MS
M.28	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	59	0,90	27	470	mg/kg MS
M.29	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	140	3,40	56	1 900	mg/kg MS
M.30	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	76	1,90	45	1 300	mg/kg MS
M.31	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	57	3,40	96	2 100	mg/kg MS
M.32	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	520	10,00	160	7 600	mg/kg MS
M.33	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	60	0,90	30	520	mg/kg MS
M.34	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	52	4,30	85	3 000	mg/kg MS
M.35	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	37	0,70	30	410	mg/kg MS
M.66	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	110	5,50	85	3 500	mg/kg MS
M.67	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	150	4,80	89	6 200	mg/kg MS
M.76	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	380	0,70	25	37	mg/kg MS
M.77	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	450	0,70	22	42	mg/kg MS
M.78	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	100	4,20	76	3 600	mg/kg MS
M.79	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	360	21,00	270	13 000	mg/kg MS
M.80	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	58	1,60	35	920	mg/kg MS
M.81	42 583	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	180	4,70	110	4 800	mg/kg MS
TP-RAM-6a	43 132	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	Muzeray, Rampont	310	6,50	120	4 800	mg/kg MS
CRA01	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	Bois Brûlé, Conteville	370	31,00	1 800	22 000	mg/kg MS
CRA02	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	Bois Brûlé, Conteville	170	5,10	390	3 400	mg/kg MS
CONTE1	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	Bois Brûlé, Conteville	66	4,20	160	1 800	mg/kg MS
CONTE2	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	Bois Brûlé, Conteville	100	4,10	530	2 300	mg/kg MS
TPJ1-2	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	220	140,00	2 500	110 000	mg/kg MS
TPJ1-3	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	300	110,00	2 000	81 000	mg/kg MS
TPJ1-TEM2	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	24	2,40	87	1 300	mg/kg MS
TPJ1-TEM3	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	23	1,10	170	590	mg/kg MS
TPJ2-2	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	170	38,00	730	31 000	mg/kg MS
TPJ2-TC	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	1 100	260,00	7 300	300 000	mg/kg MS
TPJ2-TEM	42 339	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	Parc Jeannette, Trélon	36	9,70	1 500	8 700	mg/kg MS
LAB-CLARK	42 339	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	Bois l'Abbé, Liessies	2 600	23,00	360	22 000	mg/kg MS
LBA-Tac3	42 339	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	Bois l'Abbé, Liessies	210	160,00	4 600	130 000	mg/kg MS
LBA-TEM1	42 339	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	Bois l'Abbé, Liessies	15	0,50	170	160	mg/kg MS

Données visant huit éléments et cinq sites de brûlage

Libéllé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Site	Arsenic (As)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	Mercure total (Hg)	Plomb (Pb)	Zinc (Zn)	Etain (Sn)	Unité
NF-AT-6	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	410	3,90	160	0	67	3 000	16	mg/kg MS
NF-AT-7	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	620	2,20	160	1	70	1 300	29	mg/kg MS
NF-AT-8	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	580	4,50	190	1	110	3 800	59	mg/kg MS
NF-AT-11	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	190	1,10	23	0	120	380	15	mg/kg MS
NF-A	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	200	0,40	110	0	46	260	200	mg/kg MS
NF-B	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	180	0,50	190	2	200	300	400	mg/kg MS
NF-H	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	120	0,30	60	3	42	130	3	mg/kg MS
NF-I	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	190	0,40	82	3	43	200	9	mg/kg MS
NF-J	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	120	0,50	66	2	33	230	10	mg/kg MS
NF-K	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	74	0,50	36	1	30	250	7	mg/kg MS
NF-L	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	120	0,40	47	0	32	180	8	mg/kg MS
NF-M	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	150	0,40	59	0	37	200	6	mg/kg MS
NF-P	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	640	0,30	150	2	53	150	6	mg/kg MS
NF-Z	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	82	0,30	58	1	71	210	15	mg/kg MS
NF-AA	01/11/16	Surface [0- 5cm]	Noire Fontaine	63	0,30	41	0	29	170	26	mg/kg MS
MUZ-T4-1	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	78	8,00	390	2	150	6 900	18	mg/kg MS
MUZ-T4-2	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	280	17,00	730	3	240	13 000	20	mg/kg MS
MUZ-CHEMIN	01/07/15	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	25	0,90	33	0	41	440	3	mg/kg MS
M.26	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	28	0,60	37	0	27	370	7	mg/kg MS
M.29	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	140	3,40	150	1	56	1 900	8	mg/kg MS
M.30	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	76	1,90	100	0	45	1 300	20	mg/kg MS
M.31	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	57	3,40	180	1	96	2 100	8	mg/kg MS
M.32	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	520	10,00	880	2	160	7 600	11	mg/kg MS
M.33	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	60	0,90	51	0	30	520	3	mg/kg MS
M.34	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	52	4,30	220	1	85	3 000	120	mg/kg MS
M.35	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	37	0,70	47	0	30	410	4	mg/kg MS
M.66	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	110	5,50	320	2	85	3 500	43	mg/kg MS
M.67	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	150	4,80	1 300	0	89	6 200	30	mg/kg MS
M.77	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	450	0,70	19	0	22	42	2	mg/kg MS
M.78	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	100	4,20	200	1	76	3 600	4	mg/kg MS
M.79	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	360	21,00	960	4	270	13 000	13	mg/kg MS
M.80	01/08/16	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	58	1,60	77	0	35	920	2	mg/kg MS
TP-RAM-6a	01/02/18	Surface [0- 5cm]	Muzeray, Rampont	310	6,50	340	1	120	4 800	22	mg/kg MS
CRA01	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	370	31,00	740	7	1 800	22 000	220	mg/kg MS
CRA02	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	170	5,10	510	3	390	3 400	60	mg/kg MS
CONTE1	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	66	4,20	170	5	160	1 800	10	mg/kg MS
CONTE2	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	Bois Brûlé, Conteville	100	4,10	570	3	530	2 300	20	mg/kg MS
TPJ1-2	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	220	140,00	9 400	22	2 500	110 000	180	mg/kg MS
TPJ1-3	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	300	110,00	7 000	17	2 000	81 000	130	mg/kg MS
TPJ1-TEM2	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	24	2,40	140	1	87	1 300	5	mg/kg MS
TPJ1-TEM3	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	23	1,10	160	2	170	590	4	mg/kg MS
TPJ2-2	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	170	38,00	3 000	3	730	31 000	63	mg/kg MS
TPJ2-TC	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	1 100	260,00	23 000	32	7 300	300 000	240	mg/kg MS
TPJ2-TEM	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Parc Jeannette, Trélon	36	9,70	730	2	1 500	8 700	46	mg/kg MS
LAB-CLARK	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	2 600	23,00	890	22	360	22 000	13	mg/kg MS
LBA-Tac3	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	210	160,00	28 000	65	4 600	130 000	990	mg/kg MS
LBA-TEM1	01/12/15	Surface [0- 5cm]	Bois l'Abbé, Liessies	15	0,50	24	0	170	160	15	mg/kg MS

ANNEXE F

Principe de l’Analyse en Composante Principale

Plus de la moitié de la communauté des géochimistes utilisent l'Analyse en Composante Principale (ACP) pour exploiter sur le plan statistique et interpréter des populations de données importantes et complexe, l'autre moitié utilise des indices de Nemerov dans le but d'établir des relations par des corrélations entre variables. L'ACP est une pratique habituelle des géochimistes (Grunsky et De Caritat, 2017)[2123]. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) ou PCA (en anglais), ou encore Transformation de Karhunen–Loève (KLT), est une méthode de statistiques multivariées, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées ») en nouvelles variables dé-corrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante (Lebart et al, 1997)[2124]. Mathématiquement, l'ACP consiste à projeter les points sur une droite, un plan... un sous-espace à s dimensions (avec s ≤ p, p étant le nombre de variables), choisi de façon à optimiser la dispersion des données. Intuitivement cela équivaut à mieux voir le nuage de points sur l'espace projeté et cela correspond à une condition dite d'inertie forte.
Soit la matrice des observations X_{np} ou chacune des n lignes représente une observation de p variables. On suppose ces observations centrées réduites pour être comparables et le vecteur $u_1$qui serait le premier axe principal de solution recherchée. Les projections des n observations sur le vecteur $u_1$sont données par : $C = X\, u_1$ (produit scalaire).

La somme des carrés de ces projections (inertie) est: $C^T C = u_1^T X^T X u_1$. On choisis u_1 de façon à maximiser l'inertie : $maximum\ (\ u_1^T X^T X u_1\ avec\ u_1^T u_1 = 1\ )$

Ce problème se résout comme le système de krigeage par la méthode de Lagrange. On forme un lagrangien : $L\ = u_1^T X^T X u_1 - \lambda\ (u_1^T u_1 - 1)$ que l'on dérive par rapport au p composantes du vecteur u_1 et λ. Chacune des dérivées partielles est alors mise à zéro.

Le système se simplifie : $\begin{cases} X^T X u_1 = \lambda u_1 \\ u_1^T u_1 = 1 \end{cases}$

Il s'agit de l'équation dite des vecteurs propres et de valeurs propres de la matrice $X^T X$. On note que cette matrice est, à un facteur 1/n ou 1/(n-1) près, la matrice de variances (sur la diagonale) et de covariances (hors-diagonale) des p variables. Pour les autres vecteurs qui sont orthogonaux entre eux, on poursuit la démarche. Par exemple

$$\begin{cases} u_2 X^T X u_2 est\ maximum \\ u_2^T u_1 = 1\ et\ u_2^T u_2 = 1 \end{cases}$$

L'espace à s dimensions s ≤ p donnant la meilleure explication (en termes d'inertie) du nuage original est donc défini par les s vecteurs propres de X'X associés aux plus grandes valeurs propres. L'ACP revient au final à des rotations dans un nouveau repère de coordonnées. Les composants principaux sont principalement une technique exploratoire pour rationaliser le nombre de variables dans une analyse et proposer une analyse causale spatiale approfondie.

[2123] Grunsky E.C., De Caritat P. (2017) *Advances in the use of geochemical data for mineral exploration*, Proceeding of exploration 17: sixth decennial International conference on mineral exploration, july 27, 2017, p. 451-456.

[2124] Lebart, L., A. Morineau, and M. Piron (1997) *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. 2nd ed. Dunod, Paris.

ANNEXE G
Résultats analytiques sur les sols et résidus issus des terrains de liquidation de Restes Explosifs de Guerre par brûlage (*Open Burning*)

Métaux et métalloïdes. Terrain de brûlage de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

Site	Localisation	Libellé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Nature de l'échantillon	Laboratoire	Unité	Arsenic (As)	Chrome total (Cr)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	**Mercure total (Hg)**	Nickel (Ni)	Plomb (Pb)	Antimoine (Sb)	Zinc (Zn)	**Etain (Sn)**	Aluminium (Al)
Site de brûlage de munitions FN Pickett & Fils de la "Place à gaz" à Gremilly (département de la Meuse)	FOSSE 1 (Fosse de brûlage nord-est)	SPIN 01	15/04/2014	Surface [0- 5cm]	Déchets de combustion, fosse 1	LAB/BRGM	mg/kg MS	**4 400**	99	6	191	**-**	75	**143 922**	256	**2 219**	**-**	-
		RESIDU 01	15/04/2014	-	Déchets résineux, fosse 1	LAB/BRGM	mg/kg MS	**1 124**	19	3	512	**-**	19	**24 149**	58	**512**	**-**	-
		FOS01	15/04/2014	-	Déchets de combustion, fosse 0	LAB/BRGM	mg/kg MS	312	136	6	94	**-**	50	633	34	**1 126**	**-**	-
		SPIN01-2 (0,2)	10/06/2014	0,20	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**5 300**	10	4	-	0,6	-	**38 000**	-	**1 900**	**-**	-
		SPIN01-3 (0,2)	10/06/2014	0,20	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**1 900**	14	1,1	-	0,6	-	**35 000**	-	**430**	**-**	-
		F1-3 (0,01-0,09)	10/06/2014	[0,01-0,09]	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**6 700**	16	7,2	-	0,8	-	**33 000**	-	**3 700**	**-**	-
		F1-8(0,15)	10/06/2014	0,15	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**2 400**	14	1,2	-	0,4	-	**31 000**	-	**960**	**-**	-
		F1-9 (0,15-0,2)	10/06/2014	[0,15-0,2]	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**5 800**	10	6,6	-	0,5	-	**33 000**	-	**3 200**	**-**	-
		F1-10 (0,15-0,25)	10/06/2014	[0,15-0,25]	Déchets de combustion, fosse 1	WESSLING	mg/kg MS	**4 000**	9	1,8	-	0,5	-	**33 000**	-	**860**	**-**	-
		SPM06-0.2m	22/10/2014	0,20	Déchets de combustion, fosse 2	WESSLING	mg/kg MS	**11 000**	9	25	420	0,4	18	**50 000**	-	**5 300**	**-**	-
		SPM06-1.8m	22/10/2014	1,80	Sol	WESSLING	mg/kg MS	31	37	<0,5	13	<0,1	27	290	-	61	**-**	-
		SPM06-2.8m	22/10/2014	2,80	Sol	WESSLING	mg/kg MS	23	46	<0,5	15	<0,1	35	87	-	70	**-**	-
		SPM06-3.6m	22/10/2014	3,60	Sol	WESSLING	mg/kg MS	18	52	<0,5	17	<0,1	44	180	-	95	**-**	-
	DEPOTS SATELLITES	SPIN02	15/04/2014	Surface [0- 5cm]	Sols et déchets de combustion	LAB/BRGM	mg/kg MS	**9 436**	101	80	**2947**	-	51	**2 357**	40	**30 836**	**-**	-
		SPIN03	15/04/2014	Surface [0- 5cm]	Déchets de combustion riche en métaux	LAB/BRGM	mg/kg MS	**7 660**	97	31	**2027**	-	36	**2 496**	32	**12 720**	**-**	-
	DEPOT NORD	D8	23/10/2014	Surface [0- 5cm]	Dépôt Nord, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**8 800**	27	64	**2700**	**4,8**	30	**2 000**	-	**54 000**	**-**	-
		D9	23/10/2014	Surface [0- 5cm]	Dépôt Nord, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**9 800**	32	170	**12000**	**14**	44	**6 500**	-	**130 000**	**-**	-
		SPM07-0.2m	23/10/2014	0,20	Dépôt Nord, profils	WESSLING	mg/kg MS	980	22	19	**1700**	**2,2**	19	**2 600**	-	**13 000**	**-**	-
		SPM07-0.6m	23/10/2014	0,60	Dépôt Nord, profils	WESSLING	mg/kg MS	21	47	<0,5	21	<0,1	47	29	-	120	**-**	-
		SPM07-2.0m	23/10/2014	2,00	Dépôt Nord, profils	WESSLING	mg/kg MS	20	23	<0,5	15	<0,1	27	26	-	59	**-**	-
		SPM07-3.0m	23/10/2014	3,00	Dépôt Nord, profils	WESSLING	mg/kg MS	43	29	<0,5	31	<0,1	56	35	-	130	**-**	-
		SPM07-4.2m	23/10/2014	4,20	Dépôt Nord, profils	WESSLING	mg/kg MS	15	35	<0,5	12	<0,1	27	32	-	60	**-**	-
	TACHE CENTRALE	P39	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**110 000**	24	160	-	**7,8**	-	8 200	-	**59 000**	**-**	-
		TC1	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**18 000**	-	52	**3600**	**9,8**	-	4 600	-	**28 000**	**-**	-
		TC2	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**18 000**	-	47	**2900**	**6**	-	**16 000**	-	**26 000**	**-**	-
		TC3	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**6 400**	-	36	**2700**	**8,6**	-	**1 500**	-	**15 000**	**-**	-
		TC4	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**49 000**	-	140	**9700**	**22**	-	**5 500**	-	**64 000**	**-**	-
		TC5	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Tache centrale, sols de surface	WESSLING	mg/kg MS	**120 000**	-	150	**12000**	**24**	-	**8 600**	-	**73 000**	**-**	-
		SPM01-0,1m	22/10/2014	0,10	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**19 000**	-	-	-	**-**	-	**3 800**	-	**40 000**	**-**	-
		SPM01-0,6m	22/10/2014	0,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**3 600**	-	-	-	**-**	-	180	-	**3 400**	**-**	-
		SPM01-1m	22/10/2014	1,00	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	660	-	-	-	**-**	-	33	-	**6 400**	**-**	-
		SPM01-2,6m	22/10/2014	2,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	38	-	-	-	**-**	-	27	-	150	**-**	-
		SPM01-3,8m	22/10/2014	3,80	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	35	-	-	-	**-**	-	20	-	89	**-**	-
		SPM02-0,2m	22/10/2014	0,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**53 000**	-	-	-	**-**	-	**5 700**	-	**110 000**	**-**	-
		SPM02-0,6m	22/10/2014	0,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	95	-	-	-	**-**	-	24	-	710	**-**	-
		SPM02-2,0m	22/10/2014	2,00	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	75	-	-	-	**-**	-	26	-	140	**-**	-
		SPM02-3,0m	22/10/2014	3,00	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	30	-	-	-	**-**	-	22	-	120	**-**	-
		SPM02-4,0m	22/10/2014	4,00	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	20	-	-	-	**-**	-	23	-	67	**-**	-
		SPM03-0,2m	22/10/2014	0,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**25 000**	-	-	-	**-**	-	**9 000**	-	**36 000**	**-**	-
		SPM03-0,3mPRODET	22/10/2014	0,30	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**1 300**	-	-	-	**-**	-	100	-	**1 200**	**-**	-
		SPM03-0,4m PRODET	22/10/2014	0,40	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**1 100**	-	-	-	**-**	-	33	-	680	**-**	-
		Kalk (SPM03)	22/10/2014	0,30	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**2 600**	-	-	-	**-**	-	140	-	**1 200**	**-**	-
		SPM03-0,6m	22/10/2014	0,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	64	-	-	-	**-**	-	21	-	**1 100**	**-**	-
		SPM03-1,5m	22/10/2014	1,50	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	60	-	-	-	**-**	-	20	-	**1 100**	**-**	-
		SPM03-2,6m	22/10/2014	2,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	57	-	-	-	**-**	-	22	-	130	**-**	-
		SPM03-3,7m	22/10/2014	3,70	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	78	-	-	-	**-**	-	20	-	380	**-**	-
		SPM04-0,2m	22/10/2014	0,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**17 000**	-	-	-	**-**	-	**6 200**	-	**24 000**	**-**	-
		SPM04-0,6m	22/10/2014	0,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	110	-	-	-	**-**	-	45	-	930	**-**	-
		SPM04-1,8m	22/10/2014	1,80	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	27	-	-	-	**-**	-	20	-	78	**-**	-
		SPM04-2,7m	22/10/2014	2,70	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	44	-	-	-	**-**	-	45	-	110	**-**	-
		SPM04-3,8m	22/10/2014	3,80	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	37	-	-	-	**-**	-	44	-	110	**-**	-
		SPM05-0.2m	22/10/2014	0,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	**23 000**	15	96	5100	**11**	22	**4 200**	-	**55 000**	**-**	-
		SPM05-0.6m	22/10/2014	0,60	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	170	35	0,5	23	<0,1	21	48	-	870	**-**	-
		SPM05-2.2m	22/10/2014	2,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	26	45	<0,5	17	<0,1	39	48	-	110	**-**	-
		SPM05-3.2m	22/10/2014	3,20	Tache centrale, profils	WESSLING	mg/kg MS	26	57	<0,5	17	<0,1	46	40	-	100	**-**	-
	PERIMETRE PROCHE	A3	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	180	-	1	94	0,5	-	200	-	470	**-**	-
		A11	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	130	-	1,2	65	0,6	-	130	-	560	**-**	-
		A13	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	110	-	0,6	63	0,3	-	59	-	390	**-**	-
		A18	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre rapproché de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	350	-	1,1	71	0,4	-	130	-	570	**-**	-
	PERIMETRE ELOIGNE	B5	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	59	-	0,5	25	0,2	-	39	-	260	**-**	-
		C1 bis	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	590	-	1,2	81	0,4	-	120	-	500	**-**	-
		C4 bis	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	100	-	<0,5	21	0,2	-	54	-	130	**-**	-
		C9bis	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	800	-	3,9	170	0,6	-	380	-	**3 000**	**-**	-
		C14 bis	10/06/2014	Surface [0- 5cm]	Périmètre éloigné de la tache centrale	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	130	0,3	-	48	-	270	**-**	-
	SEDIMENTS	MARE	10/06/2014	-	Sédiment de la mare à l'ouest de la Place à Gaz	WESSLING	mg/kg MS	590	-	1,2	81	0,4	-	120	-	500	**-**	-
		SED01	10/06/2014	-	Sédiment du ruisseau aval 1	WESSLING	mg/kg MS	51	30	1	-	0,2	-	62	-	340	**-**	-
		SED02	10/06/2014	-	Sédiment du ruisseau aval 2	WESSLING	mg/kg MS	11	21	<0,5	-	0,2	-	38	-	110	**-**	-
		SED03	10/06/2014	-	Sédiment du ruisseau aval 3	WESSLING	mg/kg MS	10	19	<0,5	-	0,2	-	25	-	77	**-**	-
		CONF01	15/04/2014	-	Sédiments	LAB/BRGM	mg/kg MS	148	127	6	45	**-**	67	103	27	714	**-**	-
	TERRAIN DE BRÛLAGE NORD	D8	22/10/2014	Surface [0- 5cm]	Sol	WESSLING	mg/kg MS	**8 800**	27	64	**2700**	**4,8**	30	**2 000**	-	**54 000**	**-**	-
		D9	22/10/2014	Surface [0- 5cm]	Sol	WESSLING	mg/kg MS	**9 800**	32	170	**12000**	**14**	44	**6 500**	-	**130 000**	**-**	-
		SPM07-0.2m	22/10/2014	0,20	Sol	WESSLING	mg/kg MS	980	22	19	**1700**	**2,2**	19	**2 600**	-	**13 000**	**-**	-
		SPM07-0.6m	22/10/2014	0,60	Sol	WESSLING	mg/kg MS	21	47	<0,5	21	<0,1	47	29	-	120	**-**	-
		SPM07-2.0m	22/10/2014	2,00	Sol	WESSLING	mg/kg MS	20	23	<0,5	15	<0,1	27	26	-	59	**-**	-
		SPM07-3.0m	22/10/2014	3,00	Sol	WESSLING	mg/kg MS	43	29	<0,5	31	<0,1	56	35	-	130	**-**	-
		SPM07-4.2m	22/10/2014	4,20	Sol	WESSLING	mg/kg MS	15	35	<0,5	12	<0,1	27	32	-	60	**-**	-

Métaux et métalloïdes. Terrain d'explosion, atelier de déchargement et tranchées de brûlage du site Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

Site	Localisation	Libellé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Laboratoire	Unité	Arsenic (As)	Chrome total (Cr)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	Mercure total (Hg)	Nickel (Ni)	Plomb (Pb)	Antimoine (Sb)	Zinc (Zn)	Etain (Sn)	Aluminium (Al)
TERRAIN D'EXPLOSION, ATELIER DE DECHARGEMENT DE MUNITIONS ET TRANCHEES DE BRULAGE, SITE CLERE & SCHWANDER DE NOIRE FONTAINE (VAUDONCOURT, MEUSE)	Terrain d'explosion	NF-EXP-1 Tannen	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,5	19	<0,1	-	21	-	92	2	-
		NF-EXP-2	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**250**	-	<0,6	21	0,2	-	37	-	160	12	-
		NF-EXP-03	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**180**	-	<0,5	52	0,2	-	19	-	130	3	-
		NF-EXP-04	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	<0,5	36	0,2	-	22	-	170	4	-
		NF-EXP-5	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 000**	-	0,9	-	0,2	-	82	-	430	35	-
		NF-EXP-6	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	0,9	-	0,2	-	26	-	230	4	-
		NF-EXP-8	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	48	-	0,88	-	0,16	-	34	-	160	<5	-
		NF-EXP-9	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	68	-	<0,5	-	0,1	-	26	-	180	20	-
		NF-EXP-10	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**620**	-	<0,5	-	0,2	-	31	-	180	7	-
		NF-EXP-11	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	27	-	0,7	-	0,1	-	35	-	290	4	-
		NF-EXP-12	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	-	0,2	-	22	-	150	12	-
		NF-EXP-13	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	95	-	0,6	-	-	-	-	-	390	5	-
		NF-EXP-14	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**120**	-	<0,5	-	-	-	-	-	260	4	-
	Auréole de projection	NF-PROJ-1	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,5	16	<0,1	-	20	-	75	2	-
		NF-PROJ-2	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	13	<0,1	-	23	-	78	2	-
	Atelier de déchargement et aires de brûlage	NF - 01	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**470**	-	0,8	-	-	-	66	-	370	-	-
		NF - 02	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**310**	-	0,7	-	-	-	52	-	340	-	-
		NF - B1	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	-	-	-	23	-	90	-	-
		NF - B02	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	19	-	<0,5	-	-	-	26	-	130	-	-
		NF - B05 (clark)	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**930**	-	<1,1	-	-	-	**110**	-	660	-	-
		NF - B05bis (clark01)	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**840**	-	<0,5	-	-	-	28	-	180	-	-
		NF-AT-01	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**720**	-	<0,5	-	0,8	-	27	-	170	**480**	-
		NF-AT-1	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**610**	-	<0,5	49	0,8	-	26	-	170	**420**	-
		NF-AT-2	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**780**	-	<1	**290**	0,2	-	99	-	450	**180**	-
		NF-AT-3	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 000**	-	<0,9	**110**	0,4	-	59	-	460	**160**	-
		NF-AT-4	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**190**	-	<1,5	**520**	0,6	-	**220**	-	770	**550**	-
		NF-AT-5	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**560**	-	<0,5	**170**	**21**	-	**1 400**	-	190	19	-
		NF-AT-6	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**410**	-	3,9	**160**	0,4	-	67	-	**3 000**	16	-
		NF-AT-7	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**620**	-	2,2	**160**	**1,2**	-	70	-	**1 300**	29	-
		NF-AT-8	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**580**	-	4,5	**190**	**1,3**	-	**110**	-	**3 800**	59	-
		NF-AT-9	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**530**	-	<0,5	43	0,2	-	27	-	120	4	-
		NF-AT-10	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**910**	-	<0,5	64	0,8	-	38	-	140	14	-
		NF-AT-11	juil-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**190**	-	1,1	23	0,4	-	**120**	-	380	15	-
		NF-AT-12	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**160**	-	<0,5	-	**1**	-	**120**	-	280	50	-
		NF-AT-13	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 000**	-	<0,5	-	0,5	-	28	-	170	**870**	-
		NF-AT-14	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**310**	-	<0,5	-	0,4	-	41	-	260	**2 700**	-
		NF-AT-15	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**500**	-	<0,5	-	0,3	-	24	-	120	65	-
		NF-AT-16	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**310**	-	<0,5	-	0,2	-	**130**	-	220	**140**	-
		NF-AT-17	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**100**	-	<0,5	-	0,2	-	59	-	210	**420**	-
		NF-AT-18	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**250**	-	<0,5	-	0,3	-	31	-	210	85	-
		NF-AT-19	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**220**	-	<0,9	-	0,3	-	54	-	400	**320**	-
		NF-AT-20	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**800**	-	<1,1	-	0,3	-	49	-	620	**290**	-
		NF-AT-21	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**320**	-	<0,6	-	0,4	-	**130**	-	350	**1 200**	-
		NF-AT-22	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**360**	-	<1	-	0,6	-	56	-	560	**320**	-
		NF-AT-23	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**660**	-	<1	-	0,6	-	78	-	570	59	-
		NF-AT-24	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**980**	-	<1,2	-	0,5	-	72	-	690	**100**	-
		NF-AT-25	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**590**	-	<0,5	-	0,5	-	33	-	180	4	-
		NF-AT-26	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**450**	-	<0,5	-	0,5	-	29	-	120	6	-
		NF-AT-27	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**450**	-	<0,5	-	0,4	-	26	-	110	3	-
		NF-AT-28	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**590**	-	<0,5	-	0,9	-	30	-	120	9	-
		NF-AT-29	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**730**	-	<0,5	-	0,7	-	33	-	130	9	-
		NF-AT-30	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 000**	-	<0,5	-	0,7	-	44	-	170	20	-
		NF-AT-31	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**540**	-	<0,5	-	**1,2**	-	59	-	230	38	-
		NF-AT-32	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**630**	-	<0,5	-	0,6	-	61	-	150	17	-
		NF-AT-34	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**490**	-	<0,5	-	**2,6**	-	38	-	120	6	-
		NF-AT-37	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**850**	-	<0,5	-	**1,8**	-	67	-	150	27	-
		NF-AT-38	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**910**	-	<1,1	-	0,6	-	95	-	710	**2 500**	-
		NF-AT-40	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**170**	-	<1	-	0,6	-	**170**	-	630	**380**	-
		NF-AT-41	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**180**	-	<0,5	-	0,9	-	67	-	260	97	-
		NF-AT-42	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**250**	-	4,3	-	0,7	-	79	-	**3 200**	31	-
		NF-AT-43	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**530**	-	<0,5	-	**23**	-	**140**	-	190	24	-
		NF-AT-44	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	-	-	-	-	-	62	<2	-
		NF-AT-46	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	83	-	<0,5	-	-	-	-	-	100	2	-
		NF-AT-47	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	84	-	<0,5	-	-	-	-	-	210	7	-
		NF-AT-48	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	42	-	<0,5	-	-	-	-	-	98	3	-
		NF-AT-49	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	-	-	-	-	-	130	7	-
	Champ attenant au terrain d'explosion	NF-MAIS-1	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	17	-	<0,5	-	<0,1	-	15	-	64	2	-
		NF-MAIS-2	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	16	-	<0,5	-	<0,1	-	14	-	59	<2	-
		NF-MAIS-3	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	14	-	<0,5	-	<0,1	-	11	-	33	<2	-
		NF-MAIS-4	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	17	-	<0,5	-	<0,1	-	12	-	33	<2	-
		NF-CHAMP1	sept-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	-	<0,1	-	21	-	65	2	-
	Atelier de déchargement et aires de brûlage	NF-A	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**200**	-	0,4	**110**	0,42	-	46	-	260	**200**	-
		NF-B	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**180**	-	0,5	**190**	**2,3**	-	**200**	-	300	**400**	-
		NF-C	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,3	20	0,12	-	21	-	96	4	-
		NF-D	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	<0,3	26	0,17	-	21	-	93	3	-
		NF-E	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,3	14	0,09	-	19	-	82	2	-
		NF-F	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	<0,3	20	0,2	-	20	-	89	4	-
		NF-G	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,3	13	0,12	-	18	-	77	1	-
		NF-H	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**120**	-	0,3	60	**3,4**	-	42	-	130	3	-
		NF-I	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**190**	-	0,4	82	**3,4**	-	43	-	200	9	-
		NF-J	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**120**	-	0,5	66	**1,7**	-	33	-	230	10	-
		NF-K	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	74	-	0,5	36	0,59	-	30	-	250	7	-
		NF-L	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**120**	-	0,4	47	0,31	-	32	-	180	8	-
		NF-M	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**150**	-	0,4	59	0,4	-	37	-	200	6	-
		NF-N	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**480**	-	<0,3	76	0,66	-	30	-	130	3	-
		NF-O	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**180**	-	<0,3	54	0,3	-	23	-	140	6	-
		NF-P	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**640**	-	0,3	**150**	**1,5**	-	53	-	150	6	-
		NF-Q	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**480**	-	<0,3	66	0,4	-	26	-	140	3	-
		NF-R	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,3	16	0,07	-	20	-	77	2	-
		NF-S	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	19	-	<0,3	15	0,06	-	19	-	78	1	-
		NF-T	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	21	-	<0,3	16	0,06	-	22	-	85	2	-
		NF-U	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	16	-	<0,3	15	0,08	-	15	-	80	2	-
		NF-V	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,3	17	0,07	-	20	-	84	2	-
		NF-W	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	76	-	0,3	43	0,64	-	34	-	180	7	-
		NF-X	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,3	21	0,07	-	23	-	110	3	-
		NF-Y	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	<1	-	<0,3	<1	<0,02	-	<1	-	<1	<1	-
		NF-Z	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	82	-	0,3	58	0,97	-	71	-	210	15	-
		NF-AA	nov-16	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	63	-	0,3	41	0,29	-	29	-	170	26	-
	Témoins	NF-TEM-1a	févr-18	[0-02 m]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,5	17	<0,1	-	25	-	83	<2	-
		NF-TEM-1b	févr-18	[0,2-1,8 m]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	<0,5	17	<0,1	-	26	-	76	<2	-
		NF-TEM-1c	févr-18	[1,8-2,2 m]	WESSLING	mg/kg MS	16	-	<0,5	9	<0,1	-	13	-	39	<2	-
		NF-TEM-1d	févr-18	[2,2 m]	WESSLING	mg/kg MS	15	-	<0,5	10	<0,1	-	12	-	38	<2	-
	Système de tranchées de brûlage NE - SW	NF-PM-1a	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	15	-	<0,5	5	<0,1	-	<10	-	17	<2	-
		NF-PM-1b	févr-18	[1,5-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	18	-	<0,5	7	<0,1	-	11	-	30	<2	-
		NF-PM-2b	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	**500**	-	<0,5	9	<0,1	-	14	-	38	3	-
		NF-PM-2c	févr-18	[1-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	69	-	<0,5	5	<0,1	-	<10	-	19	<2	-
	Système de tranchées de brûlage NW - SE	NF-PM-3a	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	**380**	-	<0,5	18	<0,1	-	33	-	31	<2	-
		NF-PM-3b	févr-18	[1-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	**310**	-	<0,5	9	<0,1	-	11	-	20	<2	-
		NF-PM-3c	févr-18	[1,5-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	**240**	-	<0,5	6	<0,1	-	<10	-	21	<2	-
		NF-PM-4b	févr-18	[0,7-0,8m]	WESSLING	mg/kg MS	**300**	-	<0,5	9	<0,1	-	11	-	25	10	-
		NF-PM-4a	févr-18	Surface [0,3-0,7 m]	WESSLING	mg/kg MS	**2 200**	-	<1,8	**340**	0,3	-	**200**	-	890	**770**	-
		NF-PM-5a	févr-18	Surface [0,05- 0,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	81	-	<0,6	46	0,4	-	59	-	370	35	-
		NF-PM-5b	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	31	-	<0,5	9	<0,1	-	12	-	59	2	-
		NF-PM-5c	févr-18	[1-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	25	-	<0,5	11	<0,1	-	18	-	92	10	-
	Zone à *Chunk* de TNT	NF-PM-6a	févr-18	[0,3-0,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	**1 100**	-	<3,0	85	1	-	52	-	280	**2 200**	-
		NF-PM-6b	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	43	-	<0,5	9	<0,1	-	14	-	35	18	-
		NF-PM-6c	févr-18	[1-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	41	-	<0,5	39	<0,1	-	13	-	42	3	-
		NF-PM-7a	févr-18	Surface [0- 0,3 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<1,3	**300**	0,2	-	45	-	420	32	-
		NF-PM-7b	févr-18	[0,6-2,1 m]	WESSLING	mg/kg MS	38	-	<0,5	38	0,1	-	<10	-	5	22	-
	Puits de brûlage	NF-PM-8a	févr-18	Surface [0- 0,2 m]	WESSLING	mg/kg MS	**1 000**	-	<0,9	90	0,4	-	73	-	490	39	-
		NF-PM-8b	févr-18	[0,2-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	<0,5	9	<0,1	-	11	-	35	85	-
		NF-PM-9a	févr-18	Surface [0,2-0,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	**200**	-	<0,6	**8400**	0,4	-	63	-	400	**490**	-
		NF-PM-9b	févr-18	[0,5-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,5	5	<0,1	-	<10	-	20	6	-
		NF-PM-9c	févr-18	[1,5-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	15	-	<0,5	5	<0,1	-	<10	-	17	<2,0	-
		NF-PM-10a	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	7	<0,1	-	<10	-	31	9	-
		NF-PM-10b	févr-18	[1-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	17	-	<0,5	7	<0,1	-	<10	-	24	3	-
		NF-PM-10c	févr-18	[1,5-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	35	-	<0,5	14	<0,1	-	15	-	120	8	-
	Résidus de brûlage. Puits de brûlage	BP1	févr-18	[1-2m]	WESSLING	mg/kg MS	46	-	<1,0	88	0,1	-	**100**	-	340	13	-
		BP2	févr-18	[1-2m]	WESSLING	mg/kg MS	**310**	-	<1,7	55	0,1	-	34	-	36	**2 800**	-

Métaux et métalloïdes. Atelier de déchargement et tranchées de brûlage du site Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

Site	Localisation	Libellé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Laboratoire	Unité	Arsenic (As)	Chrome total (Cr)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	Mercure total (Hg)	Nickel (Ni)	Plomb (Pb)	Antimoine (Sb)	Zinc (Zn)	Etain (Sn)	Aluminium (Al)
ATELIER DE DECHARGEMENT ET TERRAINS DE BRULAGE DU SITE CLERE & SCHWANDER DE RAMPONT A MUZERAY (MEUSE)	Atelier / usine	MUZ - 01	janv-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<0,5	-	-	-	73	-	200	-	-
		MUZ - 04	janv-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	260	-	<0,5	-	-	-	140	-	260	-	-
		MUZ - 06	janv-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	930	-	21	-	-	-	520	-	17 000	-	-
		MUZ-T3	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	39	-	<0,5	23	<0,1	-	34	-	160	6	-
	Champs attenants	MUZ-PARC-CHEVAL	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	20	<0,1	-	25	-	200	2	-
		MUZ-CHEMIN	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	25	-	0,9	33	0,1	-	41	-	440	3	-
		MUZ-PARC-KUH	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	100	-	<0,6	27	0,1	-	33	-	200	33	-
	Aire de brûlage	MUZ-T4-1	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	78	-	8	390	2,1	-	150	-	6 900	18	-
		MUZ-T4-2	juil-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	280	-	17	730	3,2	-	240	-	13 000	20	-
		MUZ-T4-3	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	180	-	5,3	-	0,2	-	88	-	5 500	26	-
		MUZ-T4-4	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	70	-	9,9	-	2,3	-	240	-	9 700	28	-
		MUZ-T4-5	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	0,7	-	0,1	-	22	-	420	<2	-
		MUZ-T4-6	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	43	-	1,3	-	0,2	-	34	-	790	3	-
		MUZ-T4-6 bis	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	53	-	2	-	0,4	-	79	-	1 600	6	-
		MUZ-T4-7	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	48	-	4,8	-	1,2	-	88	-	3 700	7	-
		MUZ-T4-8	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	180	-	12	-	1,5	-	200	-	13 000	18	-
		MUZ-T4-9	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	300	-	13	-	1,5	-	210	-	12 000	13	-
		MUZ-T4-10	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	6,7	-	1,1	-	100	-	5 300	9	-
		MUZ-T4-11	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	1 100	-	34	-	4,7	-	540	-	34 000	35	-
		MUZ-T4-12	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	-	-	-	-	-	190	<2	-
		MUZ-T4-13	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	29	-	0,7	-	-	-	-	-	390	<2	-
		MUZ-T4-14	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	27	-	<0,5	-	-	-	-	-	290	<2	-
		MUZ-T4-14bis	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	140	-	4,8	-	-	-	-	-	3 000	2	-
		MUZ-T4-14ter	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	0,8	-	-	-	-	-	430	3	-
		MUZ-T4-15	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	160	-	5,6	-	-	-	-	-	4 200	9	-
		MUZ-T4-16	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	1,7	-	-	-	-	-	800	8	-
	Atelier / usine	MUZ-T7-1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	140	-	<0,5	-	-	-	-	-	180	16	-
		MUZ-T7-2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	270	-	0,5	-	-	-	-	-	260	13	-
		MUZ-T1-1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	110	-	<0,5	-	<0,1	-	26	-	160	18	-
		MUZ-T1-3	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,5	-	-	-	-	-	66	9	-
		MUZ-T1-4	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	26	-	<0,5	-	-	-	-	-	66	12	-
		MUZ-T1-5	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	400	-	<0,6	-	-	-	-	-	89	510	-
		MUZ-T1-6	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	19	-	<0,5	-	-	-	-	-	77	<2	-
		MUZ-T2-1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<0,5	-	<0,1	-	36	-	70	590	-
		MUZ-T2-2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	270	-	1,5	-	<0,05	-	25	-	82	320	-
		MUZ-T3-2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	-	0,1	-	24	-	160	9	-
		MUZ-T3-3	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	19	-	<0,5	-	<0,1	-	20	-	110	3	-
		MUZ-T3-4	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	31	-	0,5	-	0,2	-	27	-	200	7	-
		MUZ-T5-1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	110	-	0,88	-	0,2	-	48	-	160	400	-
		MUZ-T5-2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	120	-	<0,5	-	0,2	-	59	-	170	150	-
		MUZ-T5-3	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<0,5	-	0,1	-	28	-	130	660	-
		MUZ-T5-4	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	110	-	<0,5	-	<0,1	-	37	-	150	220	-
		MUZ-T6-1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	120	-	1,3	-	0,1	-	40	-	630	38	-
		MUZ-T6-2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	200	-	<0,5	-	<0,1	-	38	-	190	110	-
		MUZ-T6-3	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	84	-	<0,5	-	0,6	-	35	-	210	270	-
		MUZ-T6-3 bis	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	77	-	<0,5	-	-	-	-	-	170	84	-
	Champs attenants	MUZ-PARC1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	0,7	-	<0,1	-	79	-	250	<2	-
		MUZ-PARC2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	17	-	<0,5	-	<0,1	-	14	-	120	<2	-
		MUZ-MERL1	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	1,3	-	0,1	-	39	-	860	7	-
		MUZ-MERL2	sept-15	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	27	-	<0,5	-	<0,1	-	23	-	100	11	-
	Ateliers / usine	M.1	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	40	-	<0,5	24	<0,1	-	24	-	190	15	-
		M.2	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	36	-	<0,5	32	<0,1	-	24	-	230	17	-
		M.3	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	38	-	<0,5	22	<0,1	-	25	-	170	10	-
		M.4	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	38	-	<0,5	23	<0,1	-	37	-	180	15	-
		M.5	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	46	-	<0,5	24	<0,1	-	31	-	160	14	-
		M.6	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	52	-	<0,5	50	<0,1	-	38	-	400	18	-
		M.7	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	36	-	<0,5	22	<0,1	-	26	-	150	22	-
		M.8	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	42	-	<0,5	19	<0,1	-	25	-	110	290	-
		M.9	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	47	-	<0,5	17	<0,1	-	25	-	99	200	-
		M.10	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	31	-	<0,5	17	<0,1	-	23	-	110	23	-
		M.11	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	47	-	<0,5	15	<0,1	-	32	-	90	88	-
		M.12	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	170	-	<0,5	15	<0,1	-	33	-	88	310	-
		M.13	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	<0,5	29	0,1	-	31	-	190	92	-
		M.14	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	16	<0,1	-	23	-	150	2	-
		M.15	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	0,6	28	0,1	-	32	-	270	3	-
		M.16	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	0,6	34	0,1	-	36	-	330	3	-
		M.17	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	0,6	33	0,1	-	36	-	310	4	-
		M.18	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	36	-	<0,5	13	<0,1	-	20	-	75	31	-
		M.19	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	160	-	<0,5	15	<0,1	-	30	-	96	420	-
		M.20	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	530	-	<0,5	15	<0,1	-	49	-	86	2 200	-
		M.21	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	100	-	<0,5	13	<0,1	-	41	-	81	180	-
		M.22	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	39	-	<0,5	22	<0,1	-	21	-	200	3	-
		M.23	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	<0,5	19	<0,1	-	21	-	170	2	-
		M.24	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,5	23	<0,1	-	24	-	200	2	-
		M.25	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,5	22	<0,1	-	21	-	210	<2	-
		M.26	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	28	-	0,6	37	0,1	-	27	-	370	7	-
		M.27	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	35	-	0,7	32	0,1	-	24	-	340	<2	-
		M.28	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	59	-	0,9	42	0,1	-	27	-	470	<2	-
		M.29	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	140	-	3,4	150	0,5	-	56	-	1 900	8	-
		M.30	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	76	-	1,9	100	0,3	-	45	-	1 300	20	-
		M.31	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	57	-	3,4	180	0,8	-	96	-	2 100	8	-
		M.32	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	520	-	10	880	2,1	-	160	-	7 600	11	-
		M.33	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	60	-	0,9	51	0,2	-	30	-	520	3	-
		M.34	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	52	-	4,3	220	0,8	-	85	-	3 000	120	-
		M.35	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	37	-	0,7	47	0,1	-	30	-	410	4	-
		M.36	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	61	-	0,6	38	<0,1	-	30	-	320	6	-
		M.37	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	46	-	0,5	39	<0,1	-	27	-	290	6	-
		M.38	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	39	-	<0,5	27	<0,1	-	52	-	200	17	-
		M.39	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	340	-	<0,5	38	<0,1	-	50	-	410	1 100	-
		M.40	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	520	-	<0,6	28	<0,1	-	46	-	280	150	-
		M.41	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<0,5	27	<0,1	-	35	-	200	14	-
		M.42	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	73	-	<0,5	25	<0,1	-	76	-	210	8	-
		M.43	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	51	-	<0,5	24	<0,1	-	27	-	170	10	-
		M.44	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	56	-	<0,5	26	<0,1	-	36	-	200	15	-
		M.45	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	47	-	<0,5	25	0,1	-	26	-	160	10	-
		M.46	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	27	-	<0,5	19	<0,1	-	25	-	140	6	-
		M.47	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	29	-	<0,5	22	0,1	-	24	-	170	7	-
		M.48	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	25	-	<0,5	26	<0,1	-	22	-	160	3	-
		M.49	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	84	-	<0,5	31	0,2	-	31	-	200	10	-
		M.50	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	30	-	<0,5	27	<0,1	-	26	-	210	5	-
		M.51	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	26	-	<0,5	30	<0,1	-	25	-	240	2	-
		M.52	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	42	-	<0,5	24	<0,1	-	28	-	180	5	-
		M.53	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	28	-	0,5	24	<0,1	-	27	-	230	3	-
		M.54	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	<0,9	47	<0,1	-	31	-	520	38	-
		M.55	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	20	-	<0,5	16	<0,1	-	22	-	86	<2	-
		M.56	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	<0,5	25	<0,1	-	29	-	230	6	-
		M.57	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	170	-	<0,6	65	0,2	-	1 900	-	280	150	-
		M.58	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	38	-	<0,5	31	<0,1	-	26	-	160	11	-
		M.59	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	<0,5	47	0,2	-	23	-	140	7	-
		M.60	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	33	0,1	-	23	-	140	17	-
		M.61	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	53	-	<0,5	36	0,3	-	34	-	160	79	-
		M.62	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	57	-	<0,5	29	0,2	-	34	-	170	31	-
		M.63	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	410	-	<0,6	61	0,2	-	170	-	260	250	-
		M.64	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	150	-	<0,5	51	0,3	-	51	-	200	92	-
		M.65	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	130	-	<0,5	34	0,1	-	30	-	150	700	-
		M.66	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	110	-	5,5	320	1,5	-	85	-	3 500	43	-
		M.67	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	150	-	4,8	1300	0,2	-	89	-	6 200	30	-
		M.68	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	250	-	<0,5	26	<0,1	-	56	-	210	53	-
		M.69	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	44	-	<0,5	54	0,2	-	53	-	220	53	-
		M.70	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	32	-	<0,5	22	0,1	-	46	-	130	22	-
		M.71	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	34	-	<0,5	18	<0,1	-	20	-	110	8	-
		M.72	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	49	-	<0,5	26	<0,1	-	27	-	140	15	-
		M.73	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	110	-	<0,5	22	<0,1	-	26	-	17	8	-
		M.74	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	190	-	<0,5	21	<0,1	-	21	-	26	23	-
		M.75	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	210	-	<0,5	17	<0,1	-	18	-	22	2	-
		M.76	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	380	-	0,7	26	0,1	-	25	-	37	<2	-
		M.77	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	450	-	0,7	19	0,1	-	22	-	42	2	-
		M.78	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	100	-	4,2	200	0,6	-	76	-	3 600	4	-
		M.79	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	360	-	21	960	3,6	-	270	-	13 000	13	-
		M.80	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	58	-	1,6	77	0,2	-	35	-	920	2	-
		M.81	août-16	Surface [0-0,05 m]	WESSLING	mg/kg MS	180	-	4,7	340	<0,4	-	110	-	4 800	6	-
	Aire de brûlage	TP-RAM-1a	févr-18	[0,2-0,8 m]	WESSLING	mg/kg MS	100	-	<0,5	15	<0,1	-	11	-	110	8	-
		TP-RAM-1b	févr-18	[1,2-1,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	30	-	<0,5	10	<0,1	-	12	-	54	<2,0	-
	Atelier / usine	TP-RAM-2a	févr-18	[0,25-0,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	21	-	<0,5	21	<0,1	-	14	-	160	4	-
		TP-RAM-2b	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	9	<0,1	-	11	-	57	31	-
		TP-RAM-2c	févr-18	[1-1,45 m]	WESSLING	mg/kg MS	21	-	<0,5	8	<0,1	-	11	-	51	11	-
		TP-RAM-3a	févr-18	[0,2-0,8 m]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	<0,5	9	<0,1	-	13	-	42	7	-
		TP-RAM-3b	févr-18	[1-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	22	-	<0,5	7	<0,1	-	11	-	26	11	-
	Zone des tranchées	TP-RAM-4a	févr-18	[0,2-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	43	-	<0,5	7	<0,1	-	12	-	28	78	-
	Aire épandage	TP-RAM-5a	févr-18	[0,2-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	13 000	-	<0,5	160	0,1	-	1 300	-	81	69 000	-
		TP-RAM-5b	févr-18	[1-2 m]	WESSLING	mg/kg MS	570	-	<0,5	12	<0,1	-	28	-	51	1 100	-
		TP-RAM-5c	févr-18	[2-2,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	200	-	<1,6	9	<0,1	-	15	-	37	540	-
	Atelier / usine	TP-RAM-6a	févr-18	[0-0,2 m]	WESSLING	mg/kg MS	310	-	6,5	340	1,2	-	120	-	4 800	22	-
		TP-RAM-6b	févr-18	[0,2-0,5 m]	WESSLING	mg/kg MS	62	-	<0,5	12	<0,1	-	14	-	64	17	-
		TP-RAM-6c	févr-18	[0,5-1 m]	WESSLING	mg/kg MS	33	-	<0,5	17	<0,1	-	11	-	120	14	-
		TP-RAM-6d	févr-18	[1-1,7 m]	WESSLING	mg/kg MS	25	-	<0,5	10	<0,1	-	12	-	54	<2,0	-
	Tranchées de brûlage	Tranchee1b	févr-18	[0,6-0,7 m]	WESSLING	mg/kg MS	94	-	<0,5	14	<0,1	-	30	-	49	230	-
		Tranchee1a	févr-18	[0,2-0,6 m]	WESSLING	mg/kg MS	3 200	-	<2,0	850	3,4	-	930	-	1 200	1 900	-
		Tranchee2:0-0,2	févr-18	[0-0,2 m]	WESSLING	mg/kg MS	590	-	<0,8	80	1,1	-	180	-	370	360	-

Métaux et métalloïdes. Sites de brûlage F. Pickett & Fils de la *B-Factory* (Westroozebeke, Belgique), *C-Factory* (Trélon, Llessies, Nord), *E-Factory* (Audruicq, Pas-de-Calais) et de Conteville (Somme)

Site	Localisation	Libellé	Date de prélèvement	Profondeur (m/sol)	Laboratoire	Unité	Arsenic (As)	Chrome total (Cr)	Cadmium (Cd)	Cuivre (Cu)	Mercure total (Hg)	Nickel (Ni)	Plomb (Pb)	Antimoine (Sb)	Zinc (Zn)	Etain (Sn)	Aluminium (Al)
Usine de destruction de munitions *B-Factory* de FN Pickett & Fils, terrain de brûlage à Westroozebeke (Flandre, Belgique)	Terrain de brûlage	POEL 1	01/06/2017	Surface [0- 20cm]	WESSLING	mg/kg MS	**5 800**	-	5,5	100	**-**	-	**2 700**	-	**4 000**	**55**	-
		POEL 2	01/06/2017	Surface [0- 20cm]	WESSLING	mg/kg MS	**3 100**	-	4,5	130	**-**	-	**880**	-	**1 500**	**51**	-
	Témoin	TEM	01/06/2017	Surface [0- 20cm]	WESSLING	mg/kg MS	38	-	<0,4	25	**-**	-	68	-	130	**5**	-
	Terrain de brûlage	1 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	13	-	-	27	**-**	-	61	-	-	**-**	-
	Usine	2 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	22	-	-	246	**-**	-	**202**	-	-	**-**	-
		3 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	9	-	-	27	**-**	-	**258**	-	-	**-**	-
		4 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	18	-	-	65	**-**	-	**1 359**	-	-	**-**	-
		5 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	5	-	-	30	**-**	-	64	-	-	**-**	-
	Terrain de brûlage	6 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	**1 659**	-	-	74	**-**	-	**615**	-	-	**-**	-
	Usine	7 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	7	-	-	18	**-**	-	34	-	-	**-**	-
		8 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	7	-	-	17	**-**	-	25	-	-	**-**	-
		9 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	10	-	-	24	**-**	-	24	-	-	**-**	-
		10 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	6	-	-	27	**-**	-	50	-	-	**-**	-
		11 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	5	-	-	26	**-**	-	69	-	-	**-**	-
		12 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	5	-	-	15	**-**	-	**140**	-	-	**-**	-
		13 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	13	-	-	24	**-**	-	49	-	-	**-**	-
		14 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	19	-	-	56	**-**	-	**1 451**	-	-	**-**	-
		15 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	49	-	-	156	**-**	-	**4 331**	-	-	**-**	-
	Terrain de brûlage	16 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	30	-	-	29	**-**	-	81	-	-	**-**	-
		17 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	**2 595**	-	-	116	**-**	-	**1 284**	-	-	**-**	-
		18 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	**2 193**	-	-	82	**-**	-	**643**	-	-	**-**	-
		19 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	**1 120**	-	-	369	**-**	-	**945**	-	-	**-**	-
		20 (Bausinger, 2005)	2004	Surface [0- 20cm]	Université Mayence	mg/kg MS	13	-	-	32	**-**	-	83	-	-	**-**	-
Usine de destruction de munitions FN Pickett & Fils, Conteville (Somme) Terrain de brûlage du Bois Brûlé	Terrain de brûlage du Bois Brûlé	CRA01	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**370**	22	31	740	**6,8**	24	**1 800**	540	**22 000**	**220**	-
	Terrain de brûlage du Bois Brûlé	CRA02	20/02/2023	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**170**	18	5,1	510	**2,5**	19	**390**	26	**3 400**	**60**	-
	Terrain de brûlage du Bois Brûlé	CONTE1	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	66	-	4,2	170	**4,6**	-	**160**	-	**1 800**	**10**	-
	Terrain de brûlage du Bois Brûlé	CONTE2	18/12/2018	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**100**	-	4,1	570	**2,7**	-	**530**	-	**2 300**	**20**	-
Terrain de brûlage TRELON 1, Parc Jeannette. *C-Factory* de FN Pickett & Fils de Trélon (Nord)	Sol Tache centrale	TRE1-1	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**270**	**128,36**	**48,35**	**4 113**	**-**	-	**1 363**	-	**48 705**	**63**	-
	Sol Tache centrale	TRE1-2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**131**	86,19	**54,54**	**4 681**	**-**	-	**1 526**	-	**43 402**	**178**	-
	Sol Tache centrale	TRE1-3	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**306**	**120,71**	**89,74**	**6 219**	**-**	-	**2 177**	-	**96 273**	**116**	-
	Sol Tache centrale	TRE1-4	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	58	85,81	**24,95**	**2 217**	**-**	-	**872**	-	**18 715**	**59**	-
	Sol Tache centrale	TPJ1-2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**220**	-	**140**	**9 400**	**22**	-	**2 500**	-	**110 000**	**180**	24 000
	Sol Tache centrale	TPJ1-3	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**300**	-	**110**	**7 000**	**17**	-	**2 000**	-	**81 000**	**130**	27 000
	Témoin hors tache centrale	TPJ1-TEM2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	2,4	140	**0,7**	-	87	-	**1 300**	**5**	31 000
	Témoin hors tache centrale	TPJ1-TEM3	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	23	-	1,1	160	**1,8**	-	**170**	-	590	**4**	32 000
Terrain de brûlage TRELON 2, Parc Jeannette. *C-Factory* de FN Pickett & Fils de Trélon (Nord)	Sol Tache centrale	TRE2-1	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 115**	**146,52**	**137,79**	**13 731**	**-**	-	**3 611**	-	**185 062**	**177**	-
	Sol Tache centrale	TRE2-2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**848**	**103,67**	**193,74**	**18 229**	**-**	-	**5 139**	-	**320 303**	**224**	-
	Sol Tache centrale	TPJ2-2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**170**	-	**38**	**3 000**	**3,2**	-	**730**	-	**31 000**	**63**	27 000
	Sol Tache centrale	TRE2-3	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**2 417**	**139,21**	**183,15**	**19 229**	**-**	-	**5 088**	-	**303 172**	**159**	-
	Sol Tache centrale	TRE2-4	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 662**	**131,93**	**112,03**	**18 364**	**-**	-	**4 734**	-	**194 284**	**285**	-
	Sol Tache centrale	TPJ2-TC	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**1 100**	-	**260**	**23 000**	**32**	-	**7 300**	-	**300 000**	**240**	21 000
Terrain d'explosion	Témoin hors tache centrale (terrain d'explosion)	TPJ2-TEM	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	36	-	9,7	730	**1,6**	-	**1 500**	-	**8 700**	**46**	38 000
	Témoin hors tache centrale (terrain d'explosion)	TPJ2-TEM(2)	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	33	45	**14**	**1 700**	**-**	-	**5 300**	-	**14 000**	**220**	-
Terrain de brûlage du Bois l'Abbé. "C-Factory" FN Pickett & Fils de Liessies (Nord)	Sédiments à 150 m de la tache centrale	BAB-SED-AV	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	24	-	-	-	**-**	-	94	-	**1 800**	**-**	-
	Zone de ruissellement de la tache centrale vers le ruisseau	BAB-RUI	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	26	-	-	-	**-**	-	**680**	-	**19 000**	**-**	-
	Sol dépôt satellite à fioles *Clark*	BAB-DEPOT	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**12 000**	-	-	-	**-**	-	**5 200**	-	**270 000**	**-**	-
	Sol dépôt satellite à fioles *Clark*	LAB-CLARK	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**2 600**	-	**23**	890	**22**	-	**360**	-	**22 000**	**13**	-
	Sol Tache centrale	BAB-Tac1	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**320**	-	-	-	**-**	-	**5 000**	-	**160 000**	**-**	-
	Sol Tache centrale	BAB-Tac2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**160**	-	-	-	**-**	-	**6 000**	-	**250 000**	**-**	-
	Sol Tache centrale	LBA-Tac3	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	**210**	-	**160**	**28 000**	**65**	-	**4 600**	-	**130 000**	**990**	20 000
	Sol Tache centrale	LBA-TC8	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	18	47	6,1	320	**-**	-	**120**	-	**3 900**	**11**	-
	Témoin hors tache centrale	LBA-TEM1	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	15	-	0,5	24	**0,2**	-	**170**	-	160	**15**	21 000
	Témoin hors tache centrale	LBA-TEM1(2)	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	18	47	0,6	26	**-**	-	**160**	-	150	**12**	-
	Témoin hors tache centrale	LBA-TEM2	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	9	-	<0,5	21	**<0,1**	-	40	-	100	**<2**	20 000
	Témoin hors tache centrale	LBA-TEM2(2)	déc-15	Surface [0- 5cm]	WESSLING	mg/kg MS	11	37	<0,5	41	**-**	-	**110**	-	280	**5**	-
Terrain de brûlage de l'usine E-Factory de FN Pickett & Fils à Audruicq (Pas-de-Calais)	Terrain de brûlage	AU-B-01 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,2	25	**-**	-	35	-	74	**-**	-
		AU-B-02 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	6	-	1	202	**-**	-	**123**	-	756	**-**	-
		AU-B-03 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,3	77	**-**	-	72	-	174	**-**	-
		AU-B-04 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	6	-	2,2	502	**-**	-	**375**	-	**1 350**	**-**	-
		AU-B-05 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	1,2	251	**-**	-	**272**	-	635	**-**	-
		AU-B-06 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,8	260	**-**	-	**403**	-	527	**-**	-
		AU-B-07 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	6	-	0,3	21	**-**	-	24	-	71	**-**	-
		AU-B-08 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	10	-	0,2	36	**-**	-	38	-	92	**-**	-
		AU-B-09 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	14	-	0,3	88	**-**	-	82	-	138	**-**	-
		AU-B-10 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	8	-	0,4	90	**-**	-	84	-	164	**-**	-
		AU-B-11 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	15	-	1	515	**-**	-	**221**	-	676	**-**	-
		AU-B-12 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	9	-	1	242	**-**	-	99	-	638	**-**	-
		AU-B-13 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	9	-	0,8	206	**-**	-	97	-	505	**-**	-
		AU-B-14 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	10	-	1	284	**-**	-	**108**	-	620	**-**	-
		AU-B-15 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	11	-	0,5	145	**-**	-	72	-	279	**-**	-
		AU-B-16 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,3	26	**-**	-	30	-	71	**-**	-
		AU-B-17 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,3	33	**-**	-	48	-	90	**-**	-
		AU-B-18 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	1,7	612	**-**	-	**397**	-	**1 172**	**-**	-
		AU-B-19 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	1,7	761	**-**	-	**296**	-	**1 231**	**-**	-
		AU-B-20 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	5	-	0,6	178	**-**	-	**124**	-	439	**-**	-
		AU-B-21 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	4	-	0,9	497	**-**	-	**195**	-	674	**-**	-
		AU-B-22 (Bausinger 2014)	2014	Surface [0- 5cm]	Envilytix GmbH	mg/kg MS	4	-	0,3	44	**-**	-	38	-	116	**-**	-

Composés nitroaromatiques et leurs sous-produits de transformation. Stabilisant (1) (laboratoire Envilytix)

Analyses sur sols bruts	Abréviation	Nature	Méthode	Unité	Aire de brûlage du Bois l'Abbé à Liessie, "C-Factory" de FN Pickett & Fils														Aire de brûlage 1 du Parc Jeannette à		Aire de brûlage n°2 du Parc Jeannette à Trélon						Site de brûlage de munition F.N. Pickett & Fils de la "Place à gaz" à Gremilly (département de la Meuse)																								
					Zone de ruissellement	Sédiments, ruisseau amont	Sédiments, ruisseau aval	Dépôt de résidus de brûlage Croix bleu			Dépôt satellite de résidus de		Tache centrale				Tache centrale		Tache centrale						Tache centrale					Dépôts périphériques					Périmètre externe					Tache centrale et fosse								Dépôt Nord
					LBA-RUI	LBA-SED-AM	LBA-SED-AV	BAB-DEPOT	LBA-DP-1	LBA-DP-2	LBA-Clark1	LBA-Clark2	LBA-TC1	LBA-TC3	LBA-TC5	LBA-TC7	TP31-1	TP31-2	TP32-1	TP32-2	TP32-3	TP32-4	TP32-5	TP32-6	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	A3	A7 bis	A11	A13	A18	B5	C1 bis	C4 bis	C9bis	C14 bis	SPM01-0,6 m	SPM01-1,0m	SPM01-2,6m	SPM06-0,2m	SPM06-0,6m	SPM06-1,8m	SPM06-2,8m	SPM06-3,6m	D8 (0,2m)
Date d'échantillonnage					déc-15	déc-15	déc-15	août-14	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	déc-15	juin-14															oct-14	oct-14	oct-14	oct-14	oct-14	oct-14	oct-14	oct-14	oct-14
Nature de l'échantillon					Sol humide	Sédiment		Résidus de brûlage					Résidus de brûlage des terrains de destruction												Résidus de brûlage															sol	sol	sol	Résidus de brûlage	sol	sol	sol	sol	Résidus de brûlage
Composés / paramètres																																																		
2-Amino-4,6-dinitrotoluène	2-ADNT	Métabolite TNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,06**	**0,035**	**0,05**	**0,1**	**0,14**	**0,05**	<0,05	<0,05	<0,05	**0,06**	**0,05**	<0,05	<0,05	**0,06**	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**0,51**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,41**
4-Amino-2,6-dinitrotoluène	4-ADNT	Métabolite TNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,16**	**0,09**	**0,1**	**0,3**	**0,34**	**0,11**	<0,05	**0,05**	**0,05**	**0,1**	**0,08**	<0,05	**0,09**	**0,1**	**0,11**	<0,5	**0,97**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**0,11**	<0,05	<0,05	0,31	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,75**
Somme des Amino-dinitrotoluènes	ADNT	Métabolite TNT	-	mg/kg MS	<	<	<	<	<	**0,22**	**0,125**	**0,15**	**0,4**	**0,48**	**0,16**	<	**0,05**	**0,05**	**0,16**	**0,13**	<	**0,09**	**0,16**	**0,11**	<	**0,97**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**0,62**	<	<	**0,31**	<	<	<	<	**1,16**
4-Amino-2-nitrotoluène	4-ANT	Métabolite DNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
3,5-Dinitroaniline	3,4-DNA	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,4-Dinitrotoluène	2,4-DNT	Explosif & propulseur, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,79**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,6-Dinitrotoluène	2,6-DNT	Explosif & propulseur, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Dinitrotoluènes	DNT	Explosif & propulseur, sous produit	-	mg/kg MS	<	<	<	<	<	<	**0,79**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2,4,6-Trinitrotoluène	2,4,6-TNT, TNT "Tolite"	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,85**	<0,05	<0,05	<0,05	**0,18**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**0,39**	<0,05	<0,05	<0,05	**0,63**	<0,05	**0,29**	<0,05	**1**
1,2-Dinitrobenzène	1,2-DNB	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**2,87**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,3-Dinitrobenzène	1,3-DNB	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,1**	**8,26**	**1,44**	**0,42**	**0,07**	**0,05**	<0,05	<0,05	**0,06**	<0,05	**0,14**	**0,06**	**0,08**	**0,18**	**0,29**	**0,2**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Dinitrobenzènes	DNB	Explosif	-	mg/kg MS	<	<	<	<	**0,1**	**8,26**	**4,31**	**0,42**	**0,07**	**0,05**	<	<	**0,06**	<	**0,14**	**0,06**	**0,08**	**0,18**	**0,29**	**0,2**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1,3,5-Trinitrobenzène	1,3,5-TNB	Sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**12,9**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2-Nitroaniline	2-NA	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**0,89**	<0,05	**0,35**	**0,58**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,13**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,09**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
3-Nitroaniline	3-NA	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,88**	<0,05	**0,07**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Nitroanilines	NA	Intermédiaire, sous produit	-	mg/kg MS	<	<	<	**0,89**	<	**1,23**	**0,58**	**0,07**	<	<	<	<	<	<	**0,13**	<	<	<	<	**0,09**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1-Nitronaphthalène	1-MNN	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2-Nitronaphthalène	2-MNN	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Mononitronaphtalènes	MNN	Intermédiaire, sous produit	-	mg/kg MS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
1,3-Dinitronaphthalène	1,3-DNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,5-Dinitronaphthalène	1,5-DNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,12**	<0,05	**7,3**	**0,33**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,62**	**0,14**	**0,36**	**0,13**	**0,09**	**0,26**	**0,31**	**0,5**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**0,06**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,1**
1,6-Dinitronaphthalène	1,6-DNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,8-Dinitronaphthalène	1,8-DNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**4,07**	**0,24**	**3,02**	**51,4**	**0,83**	**0,09**	**0,09**	<0,05	<0,05	**1,47**	**0,4**	**0,94**	**0,38**	**0,22**	**0,87**	**0,76**	**1,27**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**3,99**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**0,05**	<0,05	<0,05	**0,42**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,34**
Somme des Dinitronaphtalènes	DNN	Explosif	-	mg/kg MS	<	<	<	**4,07**	**0,36**	**3,02**	**58,7**	**1,16**	**0,09**	**0,09**	<	<	**2,09**	**0,54**	**1,3**	**0,51**	**0,31**	**1,13**	**1,07**	**1,77**	<	<	<	<	<	<	**3,99**	<	<	<	<	<	<	<	<	**0,11**	<	<	**0,42**	<	<	<	<	**0,44**
1,3,5-Trinitronaphthalène	1,3,5-TNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,3,8-Trinitronaphthalène	1,3,8-TNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,92**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**1,13**	<0,05	**0,33**	**0,19**	**0,06**	**0,11**	**0,07**	**0,21**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**21**	**2,05**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,4,5-Trinitronaphthalène	1,4,5-TNN	Explosif	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**0,12**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	**1,45**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Trinitronaphtalènes	TNN	Explosif	-	mg/kg MS	<	<	<	<	<	**0,92**	<	<	<	<	<	<	**1,25**	<	**0,33**	**0,19**	**0,06**	**0,11**	**0,07**	**0,21**	<	<	<	<	<	<	**22,45**	**2,05**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Acide 2-Amino-4,6-dinitrobenzoïque	A 2-ADNB	Métabolite TNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide 4-Amino-2,6-dinitrobenzoïque	A 4-ADNB	Métabolite TNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Acides amino-dinitrobenzoïques	A-ADNB	Métabolite TNT	-	mg/kg MS	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Acide 2,4-Nitrobenzoïque	A 2,4-NB	Métabolite DNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**1,89**	**7,74**	<0,5	**1,21**	**1,59**	<0,5	**2,82**	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	**0,16**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide 2,6-Nitrobenzoïque	A 2,6-NB	Métabolite DNT	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Acides nitrobenzoïques	A-NB	Métabolite DNT	-	mg/kg MS	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**1,89**	**7,74**	<	**1,21**	**1,59**	<	**2,82**	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**0,16**	<	<	<	<	<
2-Nitrophénol	2-NP	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
3-Nitrophénol	3-NP	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
4-Nitrophénol	4-NP	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Nitrophénols	NP	Intermédiaire, sous produit	-	mg/kg MS	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2,4-Dinitrophénol	2,4-DNP	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,6-Dinitrophénol	2,6-DNP	Intermédiaire, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des Dinitrophénols	DNP	Intermédiaire, sous produit	-	mg/kg MS	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2,4,6-Trinitrophénol	2,4,6-TNP, mélinite	Explosif (mélinite)	ISO 11916-1	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	**1,56**	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des nitroaromatiques polaires	-		-	mg/kg MS	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	**1,56**	<	<	<	<	<
Acide 2,4,6-Trinitrobenzoïque	A 2,4,6-TNB	Métabolite TNT, sous produit	ISO 11916-1	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Somme des composés nitroaromatiques	-	-	-	mg/kg MS	<	<	<	**17,86**	**0,46**	**13,65**	**64,505**	**1,8**	**0,56**	**0,62**	**0,16**	<	**3,45**	**0,59**	**2,06**	**0,89**	**0,45**	**1,51**	**1,59**	**2,38**	**1,89**	**8,71**	<	**1,21**	**1,59**	<	**29,26**	**2,05**	<	<	<	<	<	<	<	**1,12**	<	<	**4,01**	**0,63**	<	**0,29**	<	**2,6**
Somme des métabolites	-			mg/kg MS	<	<	<	<	<	**0,22**	**0,125**	**0,15**	**0,48**	**0,16**	**0,16**	<	**0,05**	**0,05**	**0,16**	**0,13**	<	**0,09**	**0,16**	**0,11**	**1,89**	**8,71**	<	**1,21**	**1,59**	<	**2,82**	<	<	<	<	<	<	<	<	**0,62**	<	<	**0,47**	<	<	<	<	**1,16**
Tetryl (2 4,6-trinitrophénylméthylnitramine)	-	Explosif, propulseur	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centralite 1 (N,N'-Diethyl-N,N'-Diphenylurée)	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centralite 2 (méthyl centralite)	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centralite 3	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Akardite 1 (3-Méthyl-1,1-diphénylurée)	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Akardite 2 (3-Méthyl-1,1-diphénylurée)	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Akardite 3	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diphénylamine	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-nitrodiphénylamine	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-nitrodiphénylamine	-	Stabilisant	Interne, Envilytix	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Somme des stabilisants	-	Stabilisant	-	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Composés nitroaromatiques et leurs sous-produits de transformation. Stabilisant (2) (laboratoire Envilytix)

| Analyses sur sols bruts | Abréviation | Nature | Méthode | Unité | Terrain de brûlage FN Pickett & Fils "B-Factory" Westroosebeke (Belgique) | | Terrain de brûlage FN Pickett & Fils du Bois Brûlé, Conteville (Somme) | | Complexe de désobusage "Clere & Schwander", canton de Spincourt (département de la Meuse) | | |

Arsines et composés organo-arséniés sur brut (laboratoire envilytix)

Analyses sur sols bruts						Clark 1 (chlorure de diphénylarsine) (DA)	Clark 2 (cyanure de diphénylarsine) (DC)	Acide Diphenylarsinique (ADPA)	Triphenylarsine (TFA)	9-phenylfluorène (PAF)	(Biphényl-4-yl)diphénylarsine
Libellé	**Position de l'échantillon**	**Commune**	**Site**	**Date d'échantillonnage**	**Unité**	Clark, agent chimique irritant et sternutatoire	Clark, agent chimique irritant et sternutatoire	Résidu, impureté et oxydation du Clark	Résidu, impureté du Clark	Décomposition thermique Clark	Décomposition thermique Clark
			Méthode		-	OPCW (2011)	OPCW (2011)	KORA TV5 (2008)	OPCW (2011)	méyhode interne	méyhode interne
			Laboratoire		-	Envilytix GmbH	Envilytix GmbH	Envilytix GmbH	Envilytix GmbH	Envilytix GmbH	Envilytix GmbH
LBA-RUI	Sols humides de surface	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, zone de ruissellement, "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-SED-AM	Sédiment	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, sédiment ruisseau amont "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-SED-AV	Sédiment	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, sédiment ruisseau aval "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-DP-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, résidus de brûlage à tessons "C-Factory"	déc.-15	mg/kg MS	-	-	**0,16**	<0,05	<0,05	-
LBA-DP-2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, résidus de brûlage à tessons "C-Factory"	déc.-15	mg/kg MS	-	-	**20,70**	**25,80**	**15,40**	-
LBA-Clark1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, résidus de brûlage à tessons "C-Factory"	juil.-16	mg/kg MS	-	-	**13,10**	<0,05	<0,05	-
LBA-Clark2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, résidus de brûlage à tessons "C-Factory"	juil.-16	mg/kg MS	-	-	**1,40**	<0,05	<0,05	-
BAB-DEPOT	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, résidus de brûlage à tessons "C-Factory"	juil.-16	mg/kg MS	-	-	**15,60**	**81,40**	**11,50**	-
LBA-TC1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, terrain de brûlage "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-TC3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, terrain de brûlage "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-TC5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, terrain de brûlage "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
LBA-TC7	Sols de surface [0 - 5 cm]	Liessies (Nord)	Bois l'Abbé, terrain de brûlage "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
TPJ1-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 1 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
TPJ1-2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 1 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
TPJ2-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	-
TPJ2-2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	**0,21**	<0,05	<0,05	-
TPJ2-3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	**0,29**	<0,05	<0,05	-
TPJ2-4	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	**0,57**	<0,05	<0,05	-
TPJ2-5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	**0,58**	<0,05	<0,05	-
TPJ2-6	Sols de surface [0 - 5 cm]	Trélon (Nord)	Parc Jeannette, terrain de brûlage 2 "C-Factory"	déc-15	mg/kg MS	-	-	**0,88**	**0,79**	**0,18**	-
POEL1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Westroosebeke (Belgique)	Terrain de brulage "D-Factory"	juin-17	mg/kg MS	<0,05	<0,05	**22,7**	**88,5**	-	-
POEL2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Westroosebeke (Belgique)	Terrain de brulage "D-Factory"	juin-17	mg/kg MS	<0,05	<0,05	**6,34**	**2,89**	-	-
SPI-B-09	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juillet 2011 (Bausinger, 2011)	mg/kg MS	<0,25	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
SPI-B-09a	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juillet 2011 (Bausinger, 2011)	mg/kg MS	<0,25	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
SPI-B-10	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juillet 2011 (Bausinger, 2011)	mg/kg MS	<0,25	<0,1	<0,1	**0,56**	<0,1	<0,1
SPI-B-11	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	juillet 2011 (Bausinger, 2011)	mg/kg MS	<0,25	<0,1	<0,1	**15,7**	<0,1	<0,1
SPI-B-14	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périphérie	juillet 2011 (Bausinger, 2011)	mg/kg MS	<0,25	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
SPM01-0,6 m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM01-1,0m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM01-2,6m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM06-0,2m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	**17,5**	<0,05	<0,05	<0,05
SPM06-0,6m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM06-1,8m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM06-2,8m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
SPM06-3,6m	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse latérale	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
D8 (0,2m)	Sols de profondeur	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage, aire nord	oct-14	mg/kg MS	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
TC1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	mg/kg MS	**4,35**	-	-	<0,0	-	<0,1
TC2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	mg/kg MS	**10,3**	-	-	**0,16**	-	<0,0
TC3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	mg/kg MS	**4,21**	-	-	<0,1	-	<0,1
TC4	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	mg/kg MS	**2,31**	-	-	<0,1	-	<0,1
TC5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	mg/kg MS	**8,46**	-	-	<0,1	-	<0,1
A3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	mg/kg MS	**3,27**	-	-	<0,1	-	<0,1
A7 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	mg/kg MS	**17**	-	-	**14**	-	**0,3**
A11	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	mg/kg MS	**0,43**	-	-	<0,1	-	<0,1
A13	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	mg/kg MS	**0,37**	-	-	<0,1	-	<0,1
A18	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	mg/kg MS	<0,1	-	-	<0,1	-	<0,1
B5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	mg/kg MS	<0,1	-	-	<0,1	-	<0,1
C1 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	mg/kg MS	**0,47**	-	-	<0,1	-	<0,1
C4 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	mg/kg MS	<0,1	-	-	<0,1	-	<0,1
C9bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	mg/kg MS	<0,1	-	-	<0,1	-	<0,1
C14 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	mg/kg MS	<0,1	-	-	<0,1	-	<0,1
NF-AT-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	**18,1**	<0,05	**21,6**	**1,37**	-	-
NF-AT-2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,06	-	-
NF-AT-3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	**3,42**	<0,05	<0,05	**1,44**	-	-
NF-AT-4	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**0,17**	-	-
NF-AT-5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**14,8**	-	-
NF-AT-6	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**1,37**	-	-
NF-AT-7	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**0,96**	-	-
NF-AT-8	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**0,14**	-	-
NF-AT-9	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**1,06**	-	-
NF-AT-10	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	**1,88**	-	-
NF-PROJ-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (terrain d'explosion) (Meuse)	Terrain d'explosion	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
NF-PROJ-2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
NF-EXP-1 Tannen	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
NF-EXP-2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-Chemin	Sols de surface [0 - 5 cm]	Usine de destruction de munitions "Clere & Schwander" de Rampont à Museray (Meuse)	Chemin	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-Parc Cheval	Sols de surface [0 - 5 cm]		Pâture	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-Parc Kuh	Sols de surface [0 - 5 cm]		Pâture	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-T4-1	Sols de surface [0 - 5 cm]		Aire de brûlage	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-T4-2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Aire de brûlage	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
MUZ-T4-3	Sols de surface [0 - 5 cm]		Aire de brûlage	juil-15	mg/kg MS	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
BP1	Sols de profondeur (vers 1,5 m)	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Puits de brûlage	févr-18	mg/kg MS	**1,13**	<0,05	<0,05	**0,19**	<0,05	-
BP2	Sols de profondeur (vers 1,5 m)	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Puits de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,05	**0,15**	<0,05	-
NF-PM2b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**0,23**	**0,14**	<0,05	-
NF-PM4a	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**0,74**	<0,05	<0,05	-
NF-PM4b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
NF-PM5a	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
NF-PM5b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**0,1**	**0,12**	<0,05	-
NF-PM7a	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**96,6**	**1,83**	**1,06**	-
NF-PM7b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**0,22**	<0,05	<0,05	-
NF-PM8a	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	**0,5**	<0,05	**0,7**	**1,54**	**0,17**	-
NF-PM8b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
NF-PM9a	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	**0,24**	**0,65**	<0,05	-
NF-PM9b	Sols de profondeur	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
RAM1a	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
RAM1a (0,2)	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
RAM1b	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
RAM1b (1,2)	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
Tranchée 2 (0 - 0,2)	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de quatre tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
Tranchée 1a	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de quatre tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
Tranchée 1b	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de quatre tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
Tranchée 2a	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de quatre tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-
Tranchée 2b	Sols de profondeur	Rampont, Muzeray (Meuse)	Système de quatre tranchées de brûlage	févr-18	mg/kg MS	<0,15	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	-

Arsines et composés organo-arséniés sur lixiviat (laboratoire Envilytix)

Analyses sur éluats (rapport sol /eau = 1:1)						Clark 1 (chlorure de diphénylarsine) (DA)	Clark 2 (cyanure de diphénylarsine) (DC)	Acide Diphénylarsinique (ADPA)	Triphénylarsine (TPF)	9-phenylfluorène (PAF)	(Biphényl-4-yl)diphénylarsine	Composés éthylarséniés	Composés phénylarséniés	Composés diphénylarséniés
Libellé	**Position de l'échantillon**	**Commune**	**Site**	**Date d'échantillonnage**	**Unité**	Clark, agent chimique irritant et sternutatoire	Clark, agent chimique irritant et sternutatoire	Résidu, impureté et oxydation du Clark	Résidu, impureté du Clark	Décomposition thermique Clark	Décomposition thermique Clark	-	-	-
			Laboratoire											
			Méthode							Envilytix GmBH				
SPIN01	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" fosse	avr-14	µg/L éluat	**11,8**	<0,1	-	**5,35**	**0,76**	-	<0,1	<0,1	**11,8**
SPIN02	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôt satellite	avr-14	µg/L éluat	**0,5**	<0,1	-	**1,03**	<0,1	-	<0,1	<0,1	**0,5**
SPIN 03	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôt satellite	avr-14	µg/L éluat	<0,1	<0,1	-	**0,53**	<0,1	-	<0,1	<0,1	**0,53**
SPIN 04	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	avr-14	µg/L éluat	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	<0,1
SPIN 05	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	avr-14	µg/L éluat	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	<0,1
TC1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	µg/L éluat	**4,35**	-	**2205**	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
TC2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	µg/L éluat	**10,3**	-	**24721**	**0,16**	**0,6**	<0,0	-	-	-
TC3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	µg/L éluat	**4,21**	-	**220**	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
TC4	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	µg/L éluat	**2,31**	-	**676**	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
TC5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" tache centrale	juin-14	µg/L éluat	**8,46**	-	**4947**	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
A3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	µg/L éluat	**3,27**	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
A7 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	µg/L éluat	**17**	-	**10698**	**14**	**1,64**	**0,3**	-	-	-
A11	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	µg/L éluat	**0,43**	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
A13	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	µg/L éluat	**0,37**	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
A18	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" dépôts périphériques	juin-14	µg/L éluat	<0,1	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
B5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	µg/L éluat	<0,1	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
C1 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	µg/L éluat	**0,47**	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
C4 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	µg/L éluat	<0,1	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
C9bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	µg/L éluat	<0,1	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
C14 bis	Sols de surface [0 - 5 cm]	Gremilly (Meuse)	Terrain de brulage "Place à Gaz" périmètre éloigné	juin-14	µg/L éluat	<0,1	-	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-
NF-AT-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**942**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-2	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**287**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-3	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
NF-AT-4	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**28,2**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-5	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**2450**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-6	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**611**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-7	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**421**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-8	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**422**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-9	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**260**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-10	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**1009**	-	-	-	-	-	-
NF-AT-11	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (Meuse)	Atelier de destruction de munitions	juil-15	µg/L éluat	-	-	**18,2**	-	-	-	-	-	-
NF-PROJ-1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Noire Fontaine, Vaudoncourt (terrain d'explosion) (Meuse)	Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
NF-PROJ-2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
NF-EXP-1 Tannen	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
NF-EXP-2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	**12,9**	-	-	-	-	-	-
NF-EXP-3	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
NF-EXP-4	Sols de surface [0 - 5 cm]		Terrain d'explosion	juil-15	µg/L éluat	-	-	<2,5	-	-	-	-	-	-
RAMP1	Sols de surface [0 - 5 cm]	Usine de destruction de munitions "Clere & Schwander" de Rampont à Museray (Meuse)	Aire de brûlage	juil-15	µg/L éluat	-	-	**6,16**	-	-	-	-	-	-
RAMP2	Sols de surface [0 - 5 cm]		Aire de brûlage	juil-15	µg/L éluat	-	-	**28,7**	-	-	-	-	-	-

Thianes et dérivés de l'*Ypérite* (laboratoire Envilytix)

Paramètre / composé	Nature	Méthode (Envilytix GmbH)	Unité	Terrain de brûlage FN Pickett & Fils de la "Place à Gaz" à Gremilly (Meuse)																					
				Fosse	Dépôts		Tache centrale						Dépôts périphériques					Sols éloignés					
				SPIN01	SPIN02	SPIN03	SPIN04	SPIN05	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	A3	A7Bis	A11	A13	A18	B5	C1 bis	C4 bis	C9bis	C14 bis
				avr-14					juin-14														
Bis(2-hydroxyethyl) sulfure	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bis(2-hydroxyethyl) sulfone	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Acide 2,2´-Thiodiacetique	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bis(2-chloroethyl) sulfure	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bis(2-chloroethyl) sulfone	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bis(2-chloroethyl) sulfoxyde	Sous produit de transformation des ypérites	OPCW ROP 2011	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1,4-Dithiane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1,2,5-Trithiépane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW 2017	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,4-Oxathiane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
1-Oxa-4,5-dithiépane	Impuretés odorantes des ypérites	OPCW 2017	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Monochlorobenzène	Solvant des ypérites allemandes	OPCW ROP 2011 / OPCW 2017	mg/kg MS	-	-	-	-	-	**1,27**	**1,82**	**0,81**	**1,55**	**4,54**	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
N-Ethylcarbazole	Irritant	OPCW 2017	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

| Paramètre / composé | Ateliers de neutralisation Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt (Meuse) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et BTEX (laboratoire Wessling)

Analyses sur sol brut, laboratoire Wessling	Site		Ateliers de destruction de munitions "Clere & Schwander" de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse)																						Usine de destruction de munitions "Clere & Schwander" de Rampont à Muzeray (département de la Meuse)																								Terrain de brûlage de munitions FN Pickett & Fils de la "Place à Gaz" à Gremilly (département de la Meuse)																	
	Date de prélèvement		Juillet 2015																		

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de brûlage F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

	Site		Site de destruction de munitions FN Pickett & Fils de la Place à Gaz à Gremilly (Meuse)																								
	Libellé		SPIN 01	SPIN02	SPIN03	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	A3	A7 bis	A11	A13	A18	B5	C1 bis	C4 bis	C9bis	C14 bis	SPM05-0.2m	SPM05-0.6m	SPM05-2.2m	SPM02-0.2 m	SPM02- 0.6m	SPM02-2.0m	D8 (0,2 m)
	Localisation		Fosse			tache centrale					dépôts périphériques					périmètre externe					tache centrale						Aire nord
	Profondeur		[0-5 cm]																		0,2	0,6	2,2	0,2	0,6	2,2	0,2
	Nature de l'échantillon		Résidu de brûlage								sol	Résidu de brûlage	sol	sol	sol	sol	sol	sol	sol	sol	résidus de brûlage	sol	sol	résidus de brûlage	sol	sol	résidus de brûlage
	Date d'échantillonnage		avr-14			juin-14															févr-18						
Famille	Carbone Organique Total (COT)	mg/kg MS	-	-	-	14	19	19	24	20	4,1	5,2	4,3	5	4,4	4,3	3,9	10	5,8	6,7	-	-	-	-	-	-	-
	Matière Sèche %	%	-	-	-	62	46,4	39,6	48,8	58,3	71,7	58,3	74,6	78,1	71,5	71,4	70,4	79,8	59,3	66,7	79,5	94,5	94,3	77,6	92,6	91,7	76,6
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	2,9	340	520	570	275	203	1 560	-	5,69	15,3	7,25	2,14	1,61	0,91	4,49	1,29	18,1	<0,5	920	2,92	<2,5	1 250	<2,5	<2,5	404
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	5,8	800	750	842	447	391	2 420	-	12	24	5,94	3,87	2,9	1,33	7,06	1,78	29,5	<1	1 330	<5	<5	1 990	<5	<5	705
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	3,3	600	470	388	196	251	1 350	-	4,45	13,5	1,63	2,19	1,67	<1,5	3,44	<1,5	15,1	<1,5	568	<7,5	<7,5	999	<7,5	<7,5	506
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	6,3	890	710	782	447	475	2 200	-	8,6	30	3,8	4,91	3,49	1,6	5,96	1,96	30,1	1,55	1 060	<7,5	<7,5	1 970	<7,5	<7,5	930
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	5,8	760	640	700	379	404	1 950	-	9,2	28,9	3,85	4,7	3,2	1,57	5,98	2	30	<1,5	1 030	<7,5	<7,5	1 780	<7,5	<7,5	847
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	29	4 700	3 400	2 820	1 560	2 070	8 530	-	31,8	138	15,1	24,7	19,9	11,8	24,7	13,3	133	11,6	3 440	<37,5	<37,5	7 550	<37,5	<37,5	5 090
	Octa CDD	ng/kg MS	61	7 800	6 400	4 000	2 060	2 730	11 300	-	60,6	240	36,2	56,2	51,3	31,8	45,7	38	218	36	4 640	<125	<125	10 800	<125	<125	10 900
	Somme des tetra CDD	ng/kg MS	71	6 400	9 500	9 000	7 770	4 040	25 300	-	62,3	500	24	41	30,3	7,26	94	3,83	367	3,83	15 200	55,6	<25	29 500	<25	<25	6 870
	Somme des penta CDD	ng/kg MS	100	7 200	7 500	7 060	5 530	3 970	21 000	-	83	244	36,9	37,4	26,3	14,5	63,3	10,9	284	10,9	10 500	36,2	<50	18 600	<50	<50	5 760
	Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	96	8 500	7 100	6 460	4 450	4 290	18 700	-	71,5	253	33,8	45	33,1	17,4	59,9	17	279	17	9 370	<75	<75	18 400	<75	<75	7 790
	Somme des hepta CDD	ng/kg MS	53	8 200	5 600	4 920	2 820	3 710	15 200	-	55,5	243	27,9	45	36	22,2	44,8	21,5	234	21,5	5 870	<75	<75	13 800	<75	<75	9 020
	Somme des TCDD restants	ng/kg MS	68	6 000	8 900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 430	<75	<75	6 240	<75	<75	3 930
	Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	95	6 400	6 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 720	<75	<75	13 700	<75	<75	5 510
	Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	80	6 200	5 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9 160	36,2	<50	16 600	<50	<50	5 060
	Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	24	3 500	2 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14 200	52,7	<25	28 200	<25	<25	6 460
	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	380	38 000	36 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	53	4 300	5 400	5 470	2 040	1 860	15 800	-	69,2	176	95,4	30,6	15,1	11,2	79,2	17,8	185	5,49	9 450	28,7	6,66	14 000	4,42	2,66	4 890
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	69	3 700	6 800	7 260	2 490	2 410	20 400	-	86,9	214	114	47,6	19,2	13,4	79,7	18,3	234	7,06	11 400	35,9	9,48	19 500	<5	<5	6 900
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	38	2 900	3 000	3 190	1 490	1 920	8 540	-	36,2	107	28,3	16,6	9,8	8,01	29,9	7,25	107	4,05	5 220	16,2	<5	7 520	<5	<5	3 000
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	210	4 100	6 700	8 070	2 770	3 090	23 200	-	71,4	206	44,1	51,4	21,4	14	62	15	232	7,62	10 600	36,1	9,95	20 600	<7,5	<7,5	7 860
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	21	3 300	3 600	4 240	1 730	2 110	12 600	-	34	125	28	23,2	12,3	7,02	31,6	8,09	122	3,92	5 670	17,3	<7,5	9 780	<7,5	<7,5	4 060
	2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	31	3 200	2 600	2 840	1 230	1 650	7 980	-	22,6	99,8	12,2	14,8	8,53	5,23	21	6,19	87,7	3,46	3 550	12	<7,5	6 690	<7,5	<7,5	3 330
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	11	360	1 500	2 290	800	679	6 210	-	16,4	53,2	11,1	12,9	5,55	3,55	17,6	3,68	62,8	1,89	2 590	8,98	<7,5	5 150	<7,5	<7,5	2 120
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	180	11 000	11 000	10 800	4 170	5 840	31 300	-	97,1	339	48,6	56,6	35,7	23,1	67,3	19,6	305	16,6	13 800	45	<37,5	29 500	<37,5	<37,5	16 600
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	120	1 300	2 800	4 830	1 500	1 260	14 600	-	32,7	96	16,3	25,4	11,6	<7,5	28,3	<7,5	129	<7,5	4 720	<37,5	<37,5	10 500	<37,5	<37,5	4 420
	Octa CDF	ng/kg MS	820	4 900	9 900	14 100	4 550	3 860	51 200	-	117	355	81,8	108	57,2	26,7	84,7	<25	417	<25	15 600	<125	<125	33 200	<125	<125	17 800
	Somme des tetra CDF	ng/kg MS	450	51 000	46 000	43 100	22 700	20 200	139 000	-	529	1 670	409	251	131	84,8	673	144	1 810	45,1	83 300	289	77,5	132 000	77,9	35,7	40 400
	Somme des penta CDF	ng/kg MS	280	24 000	26 000	26 100	11 800	12 300	73 700	-	318	906	263	159	76,3	57	287	67,4	929	32,5	44 000	132	37,2	72 100	<50	<50	26 900
	Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	330	26 000	26 000	29 200	12 400	14 500	88 200	-	282	895	161	179	88,2	60,1	243	61,6	899	34,3	37 600	124	<75	72 300	<75	<75	32 100
	Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	440	16 000	16 000	19 300	7 220	8 770	57 700	-	163	549	84,1	107	61	40,2	120	33,3	546	27	23 200	81,7	<150	49 700	<150	<150	26 500
	Somme des TCDF restants	ng/kg MS	390	47 000	41 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4 710	36,6	<150	9 760	<150	<150	5 480
	Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	170	17 000	16 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 200	49,9	<65,1	30 200	<75	<75	14 800
	Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	57	15 000	12 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27 400	79,6	27,7	45 100	<50	<50	17 000
	Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	140	3 100	3 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73 800	260	70,8	118 000	73,5	33	35 500
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	380	38 000	36 000	31 500	22 600	18 700	91 500	-	333	1 480	159	225	177	93,1	308	129	1 380	89,2	45 500	91,8	-/-	91 100	-/-	-/-	40 400
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	2300	120 000	120 000	132 000	58 700	59 600	409 000	-	1 410	4 370	999	803	414	269	1 410	306	4 600	139	204 000	626	115	360 000	77,9	35,7	144 000
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	2700	160 000	160 000	163 000	81 300	78 300	501 000	-	1 740	5 850	1 160	1 030	591	362	1 720	435	5 990	228	249 000	718	115	451 000	77,9	35,7	184 000
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	66	4 300	5 100	5 630	2 410	2 630	15 800	-	59,5	171	51	30,5	16,8	11,1	51	12,6	181	5,09	8 450	23,6	2,14	13 600	0,442	0,266	5 350
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	66	4 300	5 100	5 630	2 410	2 630	15 800	-	59,5	171	51	30,5	16,8	11,3	51	12,8	181	6,49	8 450	29,3	15,5	13 600	14,8	14,6	5 350
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	66	4 300	5 100	5 630	2 410	2 630	15 800	-	59,5	171	51	30,5	16,8	11,2	51	12,7	181	5,79	8 450	26,4	8,82	13 600	7,63	7,45	5 350
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	69	4 700	5 400	6 040	2 620	2 820	17 000	-	65,3	183	53,8	32,3	18,2	11,7	54,4	13,4	195	5,06	9 090	23,6	2,14	14 600	0,442	0,266	5 670
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	69	4 700	5 400	6 040	2 620	2 820	17 000	-	65,3	183	53,8	32,3	18,2	11,9	54,4	13,6	195	6,93	9 090	31,6	17,8	14 600	17,1	16,9	5 670
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	69	4 700	5 400	6 040	2 620	2 820	17 000	-	65,3	183	53,8	32,3	18,2	11,8	54,4	13,5	195	6	9 090	27,6	9,96	14 600	8,77	8,59	5 670
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	61	4 000	4 800	5 230	2 260	2 270	15 100	-	54,3	163	48,7	29,7	15,5	9,76	50,9	12,4	172	4,93	7 870	23,7	3,59	13 300	1,18	0,596	5 060
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	61	4 000	4 800	5 230	2 260	2 270	15 100	-	54,3	163	48,7	29,7	15,5	9,99	50,9	12,7	172	5,93	7 870	28,3	15,3	13 300	14,8	14,2	5 060
	Somme I du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	0,1	8,4	9,7	10,1	4,25	4,37	28,3	-	0,123	0,322	0,137	0,0533	0,0294	0,0214	0,121	0,0281	0,339	0,00954	16,9	0,0478	0,00666	24,8	0,00442	0,00266	9,01
	Somme II du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	0,45	25	33	36,6	14,3	15,4	104	-	0,377	1,09	0,355	0,215	0,105	0,0678	0,348	0,0833	1,15	0,035	53,3	0,158	0,0261	91,3	0,00442	0,00266	35,6
	Somme III du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	1,7	55	66	73,1	28,1	31,2	221	-	0,716	2,26	0,553	0,486	0,28	0,161	0,599	0,154	2,35	0,0992	95,5	0,203	0,0261	183	0,00442	0,00266	90,5
	TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	59,6	4 050	4 700	5 260	2 280	2 390	14 900	-	56,4	157	45,9	28	15,9	9,82	46,8	11,6	169	4,11	7 830	19,6	1,95	14 900	0,442	0,266	4 940
	TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	59,6	4 050	4 700	5 260	2 280	2 390	14 900	-	56,4	157	45,9	28	15,9	10	46,8	11,8	169	6	7 830	27,7	16,6	14 900	16	15,9	4 940
	TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	59,6	4 050	4 700	5 260	2 280	2 390	14 900	-	56,4	157	45,9	28	15,9	9,94	46,8	11,7	169	5,05	7 830	23,7	9,3	14 900	8,24	8,07	4 940

PCB *Dioxin Like* (PCB-DL). Site de brûlage F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

Site de destruction de munitions F.N. Pickett & Fils de la "Place à Gaz" à Gremilly (Meuse)			
PCB-*Dioxin lik* e, congénères	Unité	Laboratoire	**SPIN03**
Carbone organique total (COT)	mg/kg MS	Wessling	220 000
PCB n° 77	ng/kg MS	Wessling	**1 730**
PCB n° 81	ng/kg MS	Wessling	412
PCB n° 126	ng/kg MS	Wessling	**1 160**
PCB n° 169	ng/kg MS	Wessling	355
PCB n° 105	ng/kg MS	Wessling	**1 200**
PCB n° 114	ng/kg MS	Wessling	178
PCB n° 118	ng/kg MS	Wessling	**2 190**
PCB n° 123	ng/kg MS	Wessling	158
PCB n° 156	ng/kg MS	Wessling	755
PCB n° 157	ng/kg MS	Wessling	305
PCB n° 167	ng/kg MS	Wessling	442
PCB n° 189	ng/kg MS	Wessling	494
PCB-TEQ (OMS 1997) excl. LQ	ng/kg MS	Wessling	121
PCB-TEQ (OMS 1997) incl. ½	ng/kg MS	Wessling	121
PCB-TEQ (OMS 1997) incl. LQ	ng/kg MS	Wessling	121
PCB-TEQ (OMS 2005) excl. LQ	ng/kg MS	Wessling	127
PCB-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LQ	ng/kg MS	Wessling	127
PCB-TEQ (OMS 2005) incl. LQ	ng/kg MS	Wessling	127

Dioxines & Furanes bromées (PBDD & PBDF). Site de brûlage F.N. Pickett & Fils de la « Place à gaz » à Gremilly (département de la Meuse) (laboratoire Dioxlab)

Site de destruction de munitions FN Pickett & Fils de la "Place à gaz" à Gremilly (Meuse)					
Famille	Congénère	Unité	D8 (28/01/2015)	CONF-01 (28/01/2015)	FOS-01 (28/01/2015)
			Aire de brûlage Nord	Sédiment aval D8	Fosse de brûlage
PolyBromoDibenzoDioxines	2,3,7,8 TBDD	ng/kg MS	17,80	743,42	184,57
	1,2,3,7,8 PeBDD	ng/kg MS	99,46	**1 591,21**	**773,44**
	1,2,3,4,7,8-HxBDD	ng/kg MS	**1 301,23**	**2 218,80**	**4 586,22**
	1,2,3,6,7,8 HxBDD	ng/kg MS	**1 301,23**	**2 218,80**	**4 586,22**
	1,2,3,7,8,9-HxBDD	ng/kg MS	**1 655,73**	766,11	**2 784,90**
	1,2,3,4,6,7,8 HpBDD	ng/kg MS	55,21	703,33	352,96
	Octa BDD	ng/kg MS	**13 688,01**	**1 097,35**	**6 428,57**
	Somme des TBDD	ng/kg MS	17,80	743,42	184,57
	Somme des PeBDD	ng/kg MS	99,46	1 591,21	773,44
	Somme des HxBDD	ng/kg MS	**4 258,19**	**5 203,71**	**11 957,34**
	Somme des HpBDD	ng/kg MS	55,21	703,33	352,96
	Somme des OBDD	ng/kg MS	**13 688,01**	**1 097,35**	**6 428,57**
	Somme des PBDD	ng/kg MS	**18 118,67**	**9 339,02**	**19 696,88**
PolyBromoDibenzoFurannes	2,3,7,8 TBDF	ng/kg MS	153,43	**1 125,33**	662,75
	1,2,3,7,8 PeBDF	ng/kg MS	304,34	**2 405,04**	**1 716,72**
	2,3,4,7,8 PeBDF	ng/kg MS	313,70	**2 707,15**	**2 535,60**
	1,2,3,4,7,8-HxBDF	ng/kg MS	**3 023,71**	**2 704,87**	**24 415,68**
	1,2,3,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	<9,3	<5,6	<2,2
	1,2,3,7,8,9-HxBDF	ng/kg MS	<10,10	<5,6	<2,2
	1,2,3,7,8,9-HxBDF	ng/kg MS	<24,3	<5,6	<2,2
	1,2,3,4,6,7,8 HpBDF	ng/kg MS	**4 393,40**	**1 023,91**	**32 744,37**
	1,2,3,4,7,8,9 HpBDF	ng/kg MS	<11,8	<10,3	<1,18
	Octa BDF	ng/kg MS	**22 997,64**	**2 019,00**	260,16
	Somme des TBDF	ng/kg MS	**153,43**	**1 125,33**	662,75
	Somme des PeBDF	ng/kg MS	**618,04**	**5 112,19**	**4 252,32**
	Somme des HxBDF	ng/kg MS	**3 023,71**	**2 704,87**	**24 415,68**
	Somme des HpBDF	ng/kg MS	**4 393,40**	**1 023,91**	**32 744,37**
	Somme des OBDF	ng/kg MS	**22 997,64**	**2 019,00**	260,16
	Somme des PBDF	ng/kg MS	**31 186,22**	**11 985,30**	**62 335,28**
	Somme des PBDD & PBDF	ng/kg MS	**49 304,89**	**21 324,32**	**82 032,16**

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions Clere & Schwander de Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

	Site		Atelier de destruction de munitions "Clere & Schwander" Noire Fontaine à Vaudoncourt (département de la Meuse)																															
	Libélé		NF-AT-3	NF-AT-20	NF-AT-21	NF-AT-22	NF-AT-24	NF-AT-29	NF-AT-28	NF-AT-30	NF-EXP-8	NF-A	NF-C	NF-H	NF-J	NF-L	NF-N	NF-P	NF-T	NF-W	NF-Z	NF-TEM-1a	NF-PM-2a	NF-PM-2b	NF-PM-4a	NF-PM-4b	NF-PM-5a	NF-PM-5b	NF-PM-7a	NF-PM-7b	BP1	BP2	NF-PM-8a	NF-PM-8b	NF-PM-9a
	Localisation																																			
	Profondeur	m/sol	surface [0-20 cm]																			0-0,2 m	0,2-0,5 m	0,5-1 m	0,3-0,7 m	0,7-0,8 m	0,05-0,5 m	0,5- 1m	0-0,3 m	0,6-2,1 m	1,,5 m	1,5 m	0-0,2m	0,2-1 m	0,2- 0,5 m
	Nature de l'échantillon	-																																		
	Date d'échantillonnage	-	juil-15		sept-15							nov-16										février-18														
	COT	mg/kg MS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28000	28000	26000	25000	27000	31000	26000	25000	25000	36000	11000	220000	32000	-	23000	-	32000	22000	190000	210000	120000	64000	18000	55000
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	1	2	1	1	1	<0,5	<0,5	1	<0,5	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<0,5	<1,0	<1,0	**320**	<1,0	<6,0	<1,0	<1,0	<2,0	3	**<4,0**	<2,0	<2,0	<2,0
	1,2,3,7,8 PeCDD		7	17	1	3	2	1	<1	3	<1	5	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<1,0	<4,0	<2,0	**960**	<2,0	29	<2,0	24	<4,0	6	**6**	<4,0	<4,0	<4,0
	1,2,3,4,7,8-HxCDD		13	36	<1,5	3	3	<1,5	<1,5	2	<1,5	8	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<1,5	<3,0	<3,0	**800**	<3,0	18	<3,0	26	<6,0	7	**7**	<6,0	<6,0	<6,0
	1,2,3,6,7,8 HxCDD		21	58	2	4	5	<1,5	<1,5	6	<1,5	33	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	<1,5	<9,0	<3,0	**1 700**	<3,0	30	<3,0	31	<6,0	11	**<5,0**	<6,0	<6,0	<6,0
	1,2,3,7,8,9-HxCDD		17	44	<1,5	3	4	<1,5	<1,5	4	<1,5	16	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<1,5	<3,0	<3,0	**1 100**	<3,0	23	<3,0	30	<6,0	7	**<3,0**	<6,0	<6,0	<6,0
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD		270	710	13	24	39	<7,5	<7,5	18	9	250	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	24	<7,5	21	<15	**10 000**	<15	110	<15	150	<30	63	**21**	<30	<30	42
	Octa CDD		710	**1 600**	27	43	84	<25	<25	25	<25	590	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	56	<25	<50	<50	**42 000**	<50	110	<50	160	<100	110	**51**	<100	<100	<100
	Somme des tetra CDD		110	84	47	38	77	220	89	**1 200**	8	56	<10	13	9	15	50	76	<10	<10	22	<5,0	370	<10	**5 900**	12	410	26	890	48	110	**170**	50	<20	22
	Somme des penta CDD		150	380	33	36	49	49	11	180	9	97	<20	<20	<20	<20	<20	26	<20	<20	22	<10	62	<20	**7 800**	<20	420	13	680	62	130	**56**	23	<40	20
	Somme des Hexa CDD		250	680	28	43	59	19	10	80	12	210	<30	<30	<30	<30	<30	17	<30	<30	31	<15	43	<30	**12 000**	<30	320	26	490	45	140	**72**	<60	<60	51
	Somme des hepta CDD		450	**1 100**	24	43	65	13	10	35	17	360	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	41	<15	33	<30	**18 000**	16	200	23	260	36	130	**32**	44	<60	75
	Somme des TCDD restants		110	82	46	37	76	220	89	**1 200**	8	56	<10	13	9	15	50	76	<10	<10	22	<5,0	370	<10	**5 600**	12	410	26	890	48	110	**170**	50	<20	22
	Somme des PeCDD restants		140	370	32	34	46	48	11	180	9	91	<20	<20	<20	<20	<20	26	<20	<20	22	<10	62	<20	**6 800**	<20	390	13	660	62	120	**50**	23	<40	20
	Somme des HxCDD restants		200	540	26	33	48	19	10	69	12	160	<30	<30	<30	<30	<30	17	<30	<30	28	<15	43	<30	**8 300**	<30	250	26	410	45	120	**65**	<60	<60	51
	Somme des HpCDD restants		180	390	10	19	27	13	10	17	8	110	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	17	<15	12	<30	**7 400**	16	86	23	110	36	65	**12**	44	<60	33
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	31	64	510	130	36	10	8	16	4	13	<2	2	3	4	4	10	<2	<2	9	13	71	3	**3 200**	6	100	8	180	23	11	**12 000**	31	<4,0	190
	1,2,3,7,8 PeCDF		44	100	340	100	27	10	8	16	2	29	<2	2	3	4	5	10	<2	<2	12	6	66	<2,0	**5 900**	4	110	9	170	18	<13	**8 100**	28	<4,0	170
	2,3,4,7,8 PeCDF		18	34	38	25	11	5	3	8	2	10	<2	<2	<2	<2	<2	4	<2	<2	11	1	24	<2,0	**4 000**	3	91	<6,0	76	<20	14	**810**	13	<4,0	36
	1,2,3,4,7,8-HxCDF		60	140	280	91	33	13	9	20	2	44	<3	3	5	5	6	13	<3	<3	51	8	84	<3,0	**13 000**	11	180	17	130	20	26	**9 500**	27	<6,0	140
	1,2,3,6,7,8 HxCDF		49	130	45	23	15	5	4	9	2	40	<3	<3	<3	<3	<3	5	<3	<3	37	<1,5	29	<3,0	**5 800**	4	110	7	80	<12	21	**1 000**	<12	<6,0	33
	2,3,4,6,7,8 HxBDF		38	97	40	19	12	3	2	6	2	27	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	38	<1,5	12	<3,0	**3 300**	<3,0	71	<3,0	64	7	19	**830**	<10	<6,0	28
	1,2,3,7,8,9-HxCDF		6	25	73	17	5	2	<1,5	3	<1,5	8	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	<1,5	9	<3,0	**730**	<3,0	18	<3,0	60	<6,0	<3,0	**3 600**	<6,0	<6,0	26
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF		170	470	81	67	53	16	11	29	<7,5	190	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	300	<7,5	79	<15	**29 000**	24	310	27	180	50	110	**1 600**	39	<30	96
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF		74	210	190	53	22	<7,5	<7,5	8	<7,5	99	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	110	<7,5	33	<15	**4 600**	<15	95	<15	130	<30	<15	**6 400**	<30	<30	<100
	Octa CDF		350	870	850	240	140	31	<25	52	<25	550	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	**2 400**	38	140	<50	**33 000**	<50	750	<50	270	<100	<50	**48 000**	110	<100	280
	Somme des tetra CDF		390	**1 200**	1 000	420	280	86	53	220	39	230	<20	16	21	25	24	77	<20	<20	160	25	610	<20	**45 000**	26	**1 300**	41	**11 000**	110	230	**23 000**	150	<40	400
	Somme des penta CDF		560	**1 600**	670	350	210	60	42	120	27	320	<20	15	20	23	21	60	<20	<20	310	14	310	<20	**46 000**	24	**1 200**	50	**4 200**	120	190	**14 000**	150	<40	480
	Somme des Hexa CDF		560	**1 500**	540	250	170	44	30	85	18	400	<30	<30	23	17	21	45	<30	<30	570	14	250	<30	**49 000**	43	930	67	**2 000**	96	200	**17 000**	110	<60	350
	Somme des Hepta CDF		430	**1 100**	410	170	120	32	22	58	<30	430	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	910	<30	170	<60	**45 000**	38	610	47	670	80	150	**13 000**	97	<120	230
	Somme des TCDF restants		360	**1 100**	510	290	250	77	45	200	35	210	<20	14	18	20	20	66	<20	<20	150	12	540	<17	**42 000**	20	**1 200**	33	**11 000**	87	220	**11 000**	120	<40	220
	Somme des PeCDF restants		490	**1 400**	290	220	170	45	30	95	23	280	<20	12	17	19	16	46	<20	<20	290	7	220	<20	**36 000**	17	**1 000**	42	**4 000**	99	170	**5 400**	110	<40	280
	Somme des HxCDF restants		400	**1 100**	99	97	100	21	16	47	12	290	<30	<27	18	12	15	26	<30	<30	440	7	120	<30	**26 000**	27	540	43	**1 700**	69	130	**2 100**	81	<60	120
	Somme des HpCDF restants		180	410	140	52	40	17	11	21	<30	150	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	500	<30	56	<60	**12 000**	14	210	21	360	30	45	**4 700**	58	<120	140
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	**1 700**	**3 900**	160	200	330	300	120	**1 500**	47	**1 300**	-/-	13	9	15	50	120	-/-	-/-	170	-/-	500	-/-	**85 000**	28	**1 500**	88	**2 500**	190	620	**380**	120	-/-	170
	Somme PCDF (tetra-octa)		**2 300**	**6 200**	**3 500**	**1 400**	910	250	150	530	84	**1 900**	-/-	31	65	64	66	180	-/-	-/-	**4 300**	91	**1 500**	-/-	**220 000**	130	**4 700**	210	**18 000**	400	760	**120 000**	610	-/-	**1 700**
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)		**3 900**	**10 000**	**3 600**	**1 600**	**1 200**	550	270	**2 000**	130	**3 200**	-/-	44	74	79	120	300	-/-	-/-	**4 500**	91	**2 000**	-/-	**300 000**	160	**6 200**	290	**21 000**	590	**1 400**	**120 000**	730	-/-	**1 900**
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ		46	110	140	51	21	7	4	14	2	34	-/-	1	1	1	1	5	-/-	-/-	27	3	37	0	**6 600**	4	130	4	120	6	25	**3 700**	14	-/-	69
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ		46	110	140	51	21	8	6	14	4	35	6	6	6	7	7	10	6	6	29	5	42	6	**6 600**	8	130	11	120	25	26	**3 700**	24	12	76
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ		46	110	140	51	21	7	5	14	3	35	3	3	4	4	4	7	3	3	28	4	39	3	**6 600**	6	130	7	120	16	26	**3 700**	19	6	73
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ		48	110	140	52	22	7	4	16	2	36	-/-	1	1	1	1	5	-/-	-/-	25	3	37	0	**7 000**	4	140	4	140	6	28	**3 600**	14	-/-	69
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ		48	110	140	52	22	9	7	16	4	37	7	7	7	7	8	10	7	7	28	6	44	7	**7 000**	9	150	12	140	27	29	**3 600**	25	14	78
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ		48	110	140	52	22	8	6	16	3	37	3	4	4	4	4	8	3	3	26	4	40	4	**7 000**	7	140	8	140	16	29	**3 600**	20	7	73
	TE-BGA excl. LOQ		55	140	150	52	24	9	6	28	2	41	-/-	1	2	2	3	7	-/-	-/-	33	3	44	0	**6 200**	4	120	6	280	11	26	**4 000**	14	-/-	70
	TE-BGA incl. LOQ		55	140	150	52	24	10	7	28	4	42	6	6	6	6	7	10	6	6	35	5	47	6	**6 200**	8	130	10	280	20	28	**4 000**	23	12	76
	Somme I du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,058	0,117	0,547	0,162	0,05	0,016	0,011	0,028	0,0057	0,0282	-/-	0,00218	0,00301	0,00429	0,00428	0,0146	-/-	-/-	0,0193	2,61	31	0,275	**6 110**	3,39	121	3,7	117	6,02	25,4	**3 330**	11	-/-	58,4
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	44	106	122	45,2	19,2	6,21	3,62	13,8	1,71	33,8	-/-	0,62	0,918	1,05	1,21	4,39	-/-	-/-	22,8	0,0144	0,0951	0,0028	**8**	0,00867	0,223	0,0079	0,283	0,023	0,034	13,3	0,0439	-/-	0,224
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ		44	106	122	45,2	19,2	7,31	5,88	13,8	3,97	34,8	6,44	6,5	6,8	6,93	7,09	9,37	6,44	6,44	26,4	5,25	37,5	6,52	**6 110**	8,22	127	10,3	118	22,3	26,3	**3 330**	22,2	12,9	67,2
	Somme II du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,307	0,751	1,33	0,427	0,152	0,049	0,034	0,094	0,0133	0,233	-/-	0,00771	0,0113	0,013	0,0155	0,0423	-/-	-/-	0,164	0,0283	0,295	0,0028	**41,20**	0,0285	0,79	0,0405	0,868	0,0678	0,126	**36,3**	0,0985	-/-	0,615
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	44	**106**	**122**	**45,2**	**19,2**	6,76	4,75	**13,8**	2,84	**34,3**	3,22	3,56	3,86	3,99	4,15	6,88	3,22	3,22	24,6	3,93	**34,2**	3,4	**6 110**	5,8	**124**	7,02	**117**	**14,1**	**25,8**	**3 330**	**16,6**	6,44	**62,8**
	Somme III du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	1,87	4,65	2,49	0,852	0,487	0,095	0,045	0,225	0,0221	1,91	-/-	0,00771	0,0113	0,013	0,0155	0,0423	-/-	-/-	3,06	0,0663	0,571	0,0028	**160,0**	0,0527	2,17	0,0673	1,77	0,118	0,4	**92,3**	0,244	-/-	1,03

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions Clere & Schwander de Rampont à Muzeray (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

	Site		Usine de destruction de munition "Clere & Schwander" de Rampont, commune de Muzeray (département de la Meuse)																											
	Libélé	-	**MUZ-T4-2**	**MUZ-PARC-KUH**	**MUZ-T2-2**	**MUZ-T4-8**	**MUZ-T4-9**	**MUZ-T4-10**	**MUZ-T4-11**	**MUZ-T5-1**	**MUZ-T4-15**	**TP-RAM-1a**	**TP-RAM-6a**	**TP-RAM-6b**	**Trancheе1a**	**Trancheе1b**	**Trancheе2:0-0,2**	**Trancheе2a**	**NF-TEM-1a**	**M.13**	**M.16**	**M.18**	**M.20**	**M.34**	**M.39**	**M.40**	**M.60**	**M.67**	**M.76**	**M.81**
	Localisation	-																												
	Profondeur	-	surface [0-5cm]									[0,2-0,8m]	[0-0,2m]	[0,2-0,5m]	[0,2-0,6m]	[0,6-0,8m]	[0-0,2m]	[0,2-0,7m]	[0-0,2m]	[0-0,05m]										
	Nature de l'échantillon																													
	Date d'échantillonnage	-	juil-15		sept-15							févr-18								août-16										
Famille	COT	mg/kg MS	-	-	20000	49000	47000	84000	63000	42000	na	13000	61000	12000	-	30000	17 000	-	11000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	4,7	<1	<0,5	6,8	7,3	3,4	35	<0,5	5	<0,5	<5,0	<1,0	**240**	<2,0	<7,0	**2 700**	<0,5	<1	<1	<1	<1	3	2	<1	<1	4	<1	1
	1,2,3,7,8 PeCDD		12	2	<1	15	21	9,3	78	<1	19	<1,0	22	<2,0	**570**	<2,0	19	**1 900**	<1,0	<2	<2	<2	<2	10	10	3	<2	17	<2	4
	1,2,3,4,7,8-HxCDD		9,2	<3	<1,5	7,9	13	5,7	46	<1,5	13	<1,5	16	<3,0	**570**	3,4	19	**2 200**	<1,5	<3	<3	<3	<3	9	9	<3	<3	17	<3	4
	1,2,3,6,7,8 HxCDD		18	3,7	<1,5	13	23	9,2	84	<1,5	25	<1,5	28	<3,0	**940**	5,7	33	**3 200**	<1,5	<3	<3	<3	<3	11	16	5	<3	22	<3	6
	1,2,3,7,8,9-HxCDD		16	<3	<1,5	8,7	18	7,6	79	<1,5	23	<1,5	32	<3,0	**660**	4,6	22	**2 600**	<1,5	<3	<3	<3	<3	10	11	4	<3	18	<3	5
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD		79	27	<7,5	49	100	48	390	<7,5	110	<7,5	170	<15	**8 400**	46	200	**32 000**	<7,5	<15	19	<15	<15	72	95	31	<15	140	<15	32
	Octa CDD		120	220	<25	59	120	70	390	<25	130	<25	220	<50	**23 000**	290	**1 300**	**140 000**	<25	<50	69	<50	<50	120	500	110	<50	440	<50	52
	Somme des tetra CDD		140	14	<5	200	290	190	630	3,8	120	<5,0	220	<10	**5 400**	31	69	**12 000**	<5,0	<10	5,5	<10	<10	90	120	29	<10	130	6	47
	Somme des penta CDD		160	20	<10	180	240	110	940	<10	240	<10	250	<20	**7 300**	21	140	**12 000**	<10	<20	<20	<20	<20	110	120	32	<20	160	12	57
	Somme des Hexa CDD		160	28	<15	130	220	94	860	<15	230	<15	280	<30	**11 000**	45	230	**23 000**	<15	<30	15	<30	<30	120	120	41	<30	200	<30	63
	Somme des hepta CDD		150	43	<15	95	190	91	720	8,8	190	<15	310	<30	**16 000**	84	300	**45 000**	<15	16	34	<30	<30	130	150	52	<30	240	19	63
	Somme des TCDD restants		140	14	<5	190	290	190	600	3,8	110	<5,0	220	<10	**5 100**	31	69	**9 600**	<5,0	<10	5,5	<10	<10	87	120	29	<10	130	6	46
	Somme des PeCDD restants		140	18	<10	160	220	99	860	<10	220	<10	230	<20	**6 700**	21	120	**9 600**	<10	<20	<20	<20	<20	100	110	29	<20	140	12	53
	Somme des HxCDD restants		120	25	<15	100	170	71	650	<15	170	<15	210	<30	**8 900**	31	150	**15 000**	<15	<30	15	<30	<30	87	81	33	<30	140	<30	49
	Somme des HpCDD restants		68	16	<15	46	91	43	330	8,8	83	<15	130	<30	**7 600**	37	95	**14 000**	<15	16	14	<30	<30	62	50	22	<30	98	19	31
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	63	7,3	2	74	83	38	300	3,5	300	<0,5	69	<1,0	**1 400**	16	78	**6 800**	13	<2	2,6	<2	5,3	36	21	17	<2	39	4	12
	1,2,3,7,8 PeCDF		54	8	1,1	65	90	40	310	2,6	130	<1,0	88	<2,5	**2 800**	24	150	**16 000**	6,2	<2	2,1	<2	3,4	39	26	14	<2	63	4	15
	2,3,4,7,8 PeCDF		81	9,7	<1	93	110	55	360	2	110	<1,0	110	<2,0	**1 700**	14	130	**7 600**	1	<2	2,5	<2	<2	55	28	10	<2	73	5	16
	1,2,3,4,7,8-HxCDF		76	46	<1,5	80	120	50	380	4,2	130	<1,5	160	7,9	**7 800**	61	300	**58 000**	7,7	<3	3,1	<3	4,5	56	140	49	4	240	6	26
	1,2,3,6,7,8 HxCDF		66	13	<1,5	69	110	40	360	2	100	<1,5	140	3,8	**3 900**	24	120	**21 000**	<1,5	<3	<3	<3	<3	48	42	17	<3	110	5	22
	2,3,4,6,7,8 HxBDF		64	7,4	<1,5	71	95	42	360	2	82	<1,5	110	<3,0	**3 000**	15	57	**6 700**	<1,5	<3	<3	<3	<3	55	24	10	<3	70	4	19
	1,2,3,7,8,9-HxCDF		4,8	<3	<1,5	11	17	5,3	35	<1,5	19	<1,5	35	<3,0	**490**	6,1	53	**6 900**	<1,5	<3	<3	<3	<3	7	11	3	<3	20	<3	<3
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF		190	95	<7,5	170	300	120	940	9,4	280	<7,5	470	36	**24 000**	160	700	**180 000**	<7,5	<15	<15	<15	<15	200	290	110	<15	890	17	84
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF		26	29	<7,5	23	51	16	130	<7,5	49	<7,5	61	<15	**4 800**	52	240	**48 000**	<7,5	<15	<15	<15	<15	18	97	37	<15	210	<15	<15
	Octa CDF		110	1000	<25	96	170	71	390	35	150	<25	580	170	**32 000**	790	**32 000**	**3 400 000**	38	<50	<50	<50	<50	160	**2 500**	720	<50	**5 800**	<50	51
	Somme des tetra CDF		1200	100	9,4	1700	2200	880	5900	39	1400	5,2	1300	5,1	**23 000**	270	670	**63 000**	25	19	35	<20	22	720	260	120	21	780	62	240
	Somme des penta CDF		800	87	5,9	1100	1500	680	4600	37	1200	5,4	1500	<20	**30 000**	180	970	**84 000**	14	14	24	<20	14	570	290	110	18	820	53	220
	Somme des Hexa CDF		530	140	<15	620	890	400	2900	32	710	<15	1200	20	**37 000**	220	930	**150 000**	14	<30	<30	<30	<30	260	290	100	<30	630	26	110
	Somme des Hepta CDF		300	190	<30	270	500	180	1400	17	460	<30	730	45	**40 000**	300	**1 400**	**300 000**	<30	<60	<60	<60	<60	280	560	220	<60	**1 600**	31	140
	Somme des TCDF restants		1200	94	7,4	1600	2100	840	5600	36	1100	5,2	1200	5,1	**22 000**	250	590	**56 000**	12	19	33	<20	17	680	240	100	21	740	59	230
	Somme des PeCDF restants		660	70	4,8	980	1300	580	4000	32	940	5,4	1300	<20	**25 000**	140	700	**60 000**	6,5	14	19	<20	11	480	240	88	18	680	44	190
	Somme des HxCDF restants		320	71	<15	390	550	260	1800	23	380	<15	770	8,2	**22 000**	120	400	**60 000**	6,6	<30	<27	<30	<26	97	73	24	<26	190	11	47
	Somme des HpCDF restants		83	62	<30	74	150	48	350	7,7	130	<30	200	8,9	**11 000**	85	420	**69 000**	<30	<60	<60	<60	<60	63	170	76	<60	510	14	52
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	730	320	-/-	660	1100	550	3500	13	900	-/-	1300	-/-	**62 000**	470	**2 100**	**230 000**	-/-	16	120	-/-	-/-	570	**1 000**	260	-/-	**1 200**	37	280
	Somme PCDF (tetra-octa)		3000	1500	15	3800	5200	2200	15000	160	3900	11	5300	240	**160 000**	**1800**	**36 000**	**4 000 000**	91	32	59	-/-	36	**2 000**	**3 900**	**1 300**	39	**9 600**	170	760
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)		3700	1900	15	4500	6300	2800	19000	170	4800	11	6600	240	**220 000**	**2200**	**38 000**	**4 200 000**	91	49	180	-/-	36	**2 600**	**4 900**	**1 500**	39	**11 000**	210	**1 000**
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ		89	17	0,25	100	130	59	450	2,4	150	3,17	130	7,17	**3 670**	25,5	159	**21 800**	5,25	-/-	2,2	-/-	1,1	64	58	20	0	120	5	22
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ		89	19	3,1	100	130	59	450	4,2	150	-/-	140	1,7	**3 800**	26	190	**25 000**	3	6	6,3	6	6,5	64	58	21	6	120	8	23
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ		89	18	1,7	100	130	59	450	3,3	150	2,9	140	6,8	**3 800**	29	200	**25 000**	5,1	3	4,3	3	3,8	64	58	21	3	120	6	22
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ		95	17	0,25	110	140	64	490	2,4	160	1,5	140	4,2	**3 800**	27	200	**25 000**	4	-/-	2,1	-/-	1,1	69	60	20	0	130	5	24
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ		95	19	3,5	110	140	64	490	4,6	160	-/-	150	1,5	**4 100**	25	170	**23 000**	2,9	6,9	7,2	6,9	7,4	69	60	22	7	130	9	24
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ		95	18	1,9	110	140	64	490	3,5	160	3,4	150	7,6	**4 100**	29	180	**23 000**	5,6	3,4	4,7	3,4	4,3	69	60	21	4	130	7	24
	TE-BGA excl. LOQ		80	15	0,42	94	130	56	420	2,7	130	1,7	150	4,6	**4 100**	27	180	**23 000**	4,2	0,34	2	-/-	1,6	55	52	19	1	110	4	21
	TE-BGA incl. LOQ		80	17	2,9	94	130	56	420	4,3	130	0,11	130	1,8	**4 000**	27	160	**24 000**	3,1	5,8	5,9	5,8	6,3	55	52	20	6	110	7	22
	Somme I du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,16	0,019	0,002	0,188	0,221	0,105	0,77	0,0054	136	2,8	130	6,3	**4 000**	29	170	**24 000**	5,2	-/-	0,00508	-/-	0,00529	0	0	0	-/-	0	0	0
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	77,6	14,8	0,229	87,2	116	51,9	409	1,94	0,44	-/-	0,206	-/-	**4**	0,0304	0	**19**	0,0144	-/-	1,6	-/-	1,08	57	54	18	0	113	3	20
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ		77,6	16,7	3,32	87,2	116	51,9	409	4,19	0,96	-/-	0,807	0,0117	**24**	0,175	1	**136**	0,0283	6,44	6,72	6,44	6,96	57	54	20	7	113	8	21
	Somme II du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,47	0,097	0,003	0,514	0,704	0,305	2,42	0,0162	136	-/-	2,31	0,219	**116**	1,51	36	**3 930**	0,0663	-/-	0,0103	-/-	0,0132	0	0	0	0	1	0	0
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	77,6	15,8	1,77	87,2	116	51,9	409	3,07	1,68	1,59	127	4,37	**3 670**	23,5	**155**	**21 800**	3,93	3,22	4,16	3,22	4,02	57	54	19	3	113	6	21
	Somme III du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,99	1,5	0,003	0,908	1,45	0,629	4,65	0,0609	136	-/-	125	1,58	**3 670**	21,5	**152**	**21 800**	2,61	-/-	0,0986	-/-	0,0132	1	4	1	0	8	0	0

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions F.N. Pickett & Fils *C-Factory* de Trélon Liessies (département de la Nord) (laboratoire Wessling)

	Site		Usine *C-Factory* de FN Pickett & Fils de Trélon et Liessies (départment du Nord)																					
	Secteur		Parc Jeannette, commune de Trélon								Bois l'Abbé, commune de Liessies													
	Libellé		TPJ-1-1	TPJ-2-2	TPJ-2-1	TPJ-2-3	TPJ-2-6	TPJ-2-4	TPJ-2-5	TPJ-TEM	LBA-DP-1	LBA-DP-2	LBA-RUI	LBA-SED-AV	LBA-SED-AM	LBA-TEM-1	LBA-TC-8	LBA-TC-1	LBA-TC-2	LBA-TC-3	LBA-TC-4	LBA-TC-5	LAB-TC-6	LBA-TC-7
	Localisation		Terrain de brûlage 1.	Tache centrale, terrain de brûlage 2						Terrain d'explosion	Dépôts de résidus de brûlage à tessons de fioles d'arsine de tous		Zone de ruisellement depuis l'aire de brûlage	Ruisseau aval zone de ruissellement	Ruisseau amont zone de ruissellement	Témoin hors terrain de brûlage	Tache centrale							
	Profondeur		Sol de surface [0-5cm]																					
	Nature de l'échantillon		brûlage grisâtres riches en éléments métalliques							sol remanié (pétardement)	Résidus de		Sols humides	Sédiments	Sédiments	sol	Résidus de brûlage grisâtre riche en, fragments métalliques							
	Date d'échantillonnage		déc-15																					
	Carbone organique total (COT)	% MS	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-	-	-	9,1	7,5	na	9,6	na	7,7	na	10	na
	Matière sèche	% MB	82,9	50,4	80,7	66,3	77,3	60,3	69,2	66,5	46,5	44	44,2	49,2	73,2	55,9	65,6	72,7	74,2	71,4	69,3	64,1	59,7	72,9
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	< 0,5	4,17	33,41	7,09	11,15	11,85	37,91	-	< 1	10,91	< 0,5	0,17	< 0,5	-	-	< 0,5	-	0,62	-	0,52	-	< 0,5
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	< 1	13,86	91,13	20,93	30,16	40,93	95,82	-	4,07	45,12	2,27	0,6	< 1	-	-	< 1	-	1,69	-	1,78	-	< 1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	< 1,5	10,6	61,02	15,32	21,43	31,71	65,1	-	4,73	41,61	2,59	0,85	< 1,5	-	-	< 1,5	-	2,17	-	1,85	-	< 1,5
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	1,79	<20	90,84	21,69	33,37	46,83	94,73	-	8,32	81	4,93	1,7	< 1,5	-	-	< 1,5	-	4,33	-	3,6	-	< 1,5
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	1,66	16,66	80,41	18,56	31,58	45,74	92,5	-	7,4	62,17	4,68	1,44	< 1,5	-	-	< 1,5	-	4,03	-	3,54	-	< 1,5
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	16,16	101,74	478,93	114,53	204,83	319,71	525,02	-	86,54	362,37	47,26	15,99	< 7,5	-	-	8,69	-	45,28	-	40,42	-	11,49
	Octa CDD	ng/kg MS	39,75	151,97	478,66	176,83	373,79	547,97	781,12	-	331,95	544,27	112,94	40,21	< 25	-	-	< 25	-	111,96	-	93,9	-	26,26
	Somme des tetra CDD	ng/kg MS	9,93	207,83	967,40	294,16	443,79	471,54	1 131,31	-	36,76	**2 964,12**	32,61	6,36	6,13	-	-	6,44	-	16,21	-	18,61	-	6,37
	Somme des penta CDD	ng/kg MS	13,71	210,06	1 044,81	221,45	361,87	502,66	1 075,22	-	57,00	**1 204,44**	41,69	11,61	7,66	-	-	7,47	-	28,29	-	27,86	-	7,7
	Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	20,34	210,97	944,95	222,55	346,36	498,84	965,80	-	89,09	**1 081,88**	59,42	21,11	9,44	-	-	11,76	-	52,25	-	46,58	-	14,08
	Somme des hepta CDD	ng/kg MS	34,93	214,70	939,48	219,29	393,76	614,15	1 004,35	-	164,78	676,04	94	30,34	13,52	-	-	18,21	-	87,55	-	77	-	21,95
	Somme des TCDD restants	ng/kg MS	18,77	112,96	460,55	104,76	188,93	294,44	479,33	-	78,24	313,67	46,74	14,35	13,52	-	-	9,52	-	42,27	-	36,58	-	10,46
	Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	16,89	183,71	712,68	166,98	259,98	374,56	713,47	-	68,64	897,10	47,22	17,12	9,44	-	-	11,76	-	41,72	-	37,59	-	14,08
	Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	13,71	196,20	953,68	200,52	331,71	461,73	979,40	-	52,93	**1 159,32**	39,42	11,01	7,66	-	-	7,47	-	26,6	-	26,08	-	7,7
	Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	9,93	203,66	933,99	287,07	432,64	459,69	**1 093,40**	-	36,76	**2 953,21**	32,61	6,19	6,13	-	-	6,44	-	15,59	-	18,09	-	6,37
	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	118,66	995,53	**4 375,30**	**1 134,28**	**1 919,57**	**2 635,16**	**4 957,80**	-	679,58	**6 470,75**	340,66	109,63	36,75	-	-	43,88	-	296,26	-	263,95	-	76,36
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	10,96	76,16	422,78	132,30	157,82	186,34	467,38	-	12,02	247,28	12,77	2,82	2	-	-	2,43	-	9,79	-	11,55	-	4,26
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	9,41	75,51	397,05	124,37	147,92	194,45	542,02	-	15,32	270,26	7,04	2,09	1,25	-	-	1,76	-	7,09	-	6,24	-	2,83
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	5,21	91,55	508,91	148,75	196,04	222,20	604,67	-	21,39	245,42	8,42	2,67	1,38	-	-	2,16	-	8,67	-	7,38	-	3,23
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	13,67	<120	518,49	146,93	214,47	291,86	663,01	-	39,95	393,47	9,12	2,91	< 1,5	-	-	<3	-	10,58	-	8,91	-	3,82
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	6,53	93,77	527,18	127,66	195,05	259,99	647,54	-	35,95	253,44	7,55	2,2	< 1,5	-	-	1,91	-	7,82	-	6,98	-	2,74
	2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	4,76	88,55	503,89	129,53	188,67	238,07	612,75	-	35,62	208,52	7,96	2,64	< 1,5	-	-	1,84	-	8,7	-	7,74	-	2,84
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	2,36	14,21	64,61	13,15	24,12	36,50	69,44	-	6,50	47,37	< 1,5	0,69	< 1,5	-	-	< 1,5	-	2,78	-	2,39	-	< 1,5
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	20,78	322,12	**1 303,42**	357,33	686,33	935,47	2 161,94	-	195,41	774,48	31,79	9,31	< 7,5	-	-	7,57	-	36,56	-	31,56	-	10,8
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	11,42	54,62	146,47	50,95	83,61	113,74	212,82	-	26,73	177,42	< 7,5	1,32	< 7,5	-	-	< 7,5	-	< 7,5	-	< 7,5	-	< 7,5
	Octa CDF	ng/kg MS	58,53	339,94	654,32	294,73	436,50	580,79	970,46	-	301,24	714,90	43,27	10,88	< 25	-	-	< 25	-	41,16	-	37,27	-	< 25
	Somme des tetra CDF	ng/kg MS	90,8	**1 237,54**	**9 745,70**	**2 992,59**	**3 311,60**	**3 461,08**	**10 723,50**	-	180,01	**3 489,50**	116,94	27,73	26,43	-	-	31,03	-	112,83	-	113,94	-	45,64
	Somme des penta CDF	ng/kg MS	81,4	**1 082,05**	**6 447,96**	**1 994,42**	**2 408,70**	**2 739,77**	**7 844,46**	-	240,21	**2 658,83**	88,4	30,58	17,53	-	-	24,47	-	91,99	-	85,95	-	33,02
	Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	66,98	861,44	**4 495,08**	**1 326,22**	**1 716,25**	**2 121,42**	**5 375,63**	-	298,15	**2 012,19**	68,59	22,99	10,24	-	-	18,22	-	77,45	-	65,03	-	24,83
	Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	52,25	566,64	**1 988,35**	570,73	**1 032,69**	**1 396,11**	**3 075,60**	-	297,88	**1 289,82**	54,28	15,41	< 30	-	-	< 30	-	58,85	-	50,15	-	17,66
	Somme des TCDF restants	ng/kg MS	20,05	189,90	538,46	162,45	262,75	346,90	700,84	-	75,74	337,92	22,49	4,78	<30	-	-	<22,43	-	22,29	-	18,59	-	6,86
	Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	39,66	664,91	**2 880,91**	908,95	**1 093,94**	**1 295,00**	**3 382,89**	-	180,13	**1 109,39**	43,96	14,55	10,24	-	-	14,47	-	47,57	-	39,01	-	15,43
	Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	66,78	914,99	**5 542,00**	**1 721,30**	**2 064,74**	**2 323,12**	**6 697,77**	-	203,50	**2 143,15**	72,94	25,82	14,9	-	-	20,55	-	76,23	-	72,33	-	26,96
	Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	79,84	**1 161,38**	**9 322,92**	**2 860,29**	**3 153,78**	**3 274,74**	**10 256,12**	-	167,99	**3 242,22**	104,17	24,91	24,43	-	-	28,6	-	103,04	-	102,39	-	41,38
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	118,66	995,53	**4 375,30**	**1 134,28**	**1 919,57**	**2 635,16**	**4 957,80**	-	679,58	**6 470,75**	340,66	109,63	36,75	-	-	43,88	-	296,26	-	263,95	-	76,36
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	349,96	**4 087,61**	**23 331,41**	**7 178,69**	**8 905,74**	**10 299,17**	**27 989,65**	-	**1 317,49**	**10 165,24**	371,48	107,59	54,2	-	-	73,72	-	382,28	-	352,34	-	121,15
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	468,62	**5 083,14**	**27 706,71**	**8 312,97**	**10 825,31**	**12 934,33**	**32 947,45**	-	**1 997,07**	**16 635,99**	712,14	217,22	90,95	-	-	117,6	-	678,54	-	616,29	-	197,51
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	7,83	95,92	600,63	164,36	228,85	281,66	717,25	-	32,26	317,58	11,6	3,75	0,95	-	-	1,95	-	12,15	-	10,92	-	3,37
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	8,98	109,92	600,63	164,36	228,85	281,66	717,25	-	33,26	317,58	12,33	3,75	3,28	-	-	3,97	-	12,22	-	10,99	-	5,07
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	8,41	102,92	600,63	164,36	228,85	281,66	717,25	-	32,76	317,58	11,97	3,75	2,12	-	-	2,96	-	12,18	-	10,96	-	4,22
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	7,74	102,41	645,17	174,40	243,21	301,11	763,58	-	33,73	339,01	12,6	4,01	0,95	-	-	1,95	-	12,85	-	11,69	-	3,35
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	9,39	116,41	645,17	174,40	243,21	301,11	763,58	-	34,73	339,01	13,32	4,01	3,73	-	-	4,43	-	12,93	-	11,77	-	5,53
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	8,57	109,41	645,17	174,40	243,21	301,11	763,58	-	34,23	339,01	12,96	4,01	2,34	-	-	3,19	-	12,89	-	11,73	-	4,44
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	8,52	91,09	584,92	164,43	219,59	268,66	696,57	-	30,10	330,57	11,15	3,56	1,2	-	-	2,08	-	11,53	-	10,58	-	3,36
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	9,27	105,09	584,92	164,43	219,59	268,66	696,57	-	31,10	330,57	11,88	3,56	3,16	-	-	3,72	-	11,6	-	10,65	-	4,66
	Somme I du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	0,02	0,19	1,06	0,31	0,4	0,46	1,21	-	0,04	0,55	0,02	0,006	0,003	-	-	0,005	-	0,02	-	0,02	-	0,007
	Somme II du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	0,06	0,49	3,3	0,91	1,25	1,61	3,99	-	0,19	1,91	0,07	0,02	0,005	-	-	0,01	-	0,07	-	0,06	-	0,02
	Somme III du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand	µg/kg MS	0,2	1,46	6,36	1,9	3,04	4,1	8,64	-	1,13	4,48	0,3	0,1	0,005	-	-	0,03	-	0,3	-	0,27	-	0,07
	TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	6,53	82,69	**535,67**	**142,26**	**201,2**	**253,01**	**632,16**	-	29,27	**284,77**	10,8	3,44	0,65	-	-	1,48	-	11,01	-	10,12	-	2,65
	TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	8,18	96,69	**535,67**	**142,26**	**201,2**	**253,01**	**632,16**	-	30,27	**284,77**	11,53	3,44	3,44	-	-	3,97	-	11,08	-	10,19	-	4,83
	TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	7,36	89,69	**535,67**	**142,26**	**201,2**	**253,01**	**632,16**	-	29,77	**284,77**	11,17	3,44	2,05	-	-	2,73	-	11,05	-	10,15	-	3,74

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions F.N. Pickett & Fils *« Le Bois Brûlé »* à Conteville (département de la Somme) (laboratoire Wessling)

		Unité	Usine FN Pickett & Fils de Conteville (Somme)			
			CRA01	CRA02	CONTE1	CONTE2
			Aire de brûlage du Bois Brûlé (février 2023)	Aire de brûlage du Bois Brûlé (février 2023)	Aire de brûlage du Bois Brûlé ()	Aire de brûlage du Bois Brûlé ()
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	<3,0	<3,0	<3,0	3,6
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	<15	45	16	<15
	Octa CDD	ng/kg MS	<50	310	<50	<50
	Somme des tetra CDD	ng/kg MS	<10	15	<10	13
	Somme des penta CDD	ng/kg MS	<20	<20	11	20
	Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	<30	<30	24	16
	Somme des hepta CDD	ng/kg MS	<30	78	33	28
	Somme des TCDD restants	ng/kg MS	<10	15	<10	13
	Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	<20	<20	11	20
	Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	<30	<30	24	13
	Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	<30	33	17	28
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	4,9	7,1	<5,0	7,5
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	2,9	5	<2,0	3,7
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	3,2	7,5	2,8	5,5
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	<3,0	9,5	<3,0	4,3
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	<3,0	6,5	<3,0	3,2
	2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	<3,0	8,8	3,3	7,8
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	<15	52	<15	<15
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	<15	<15	<15	<15
	Octa CDF	ng/kg MS	<50	140	<50	<50
	Somme des tetra CDF	ng/kg MS	69	100	22	230
	Somme des penta CDF	ng/kg MS	37	84	23	65
	Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	<30	70	21	59
	Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	<60	110	<60	<60
	Somme des TCDF restants	ng/kg MS	64	95	22	220
	Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	31	72	20	56
	Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	<30	45	18	43
	Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	<60	61	<60	<60
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	-/-	400	68	77
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	110	510	66	350
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	110	900	130	430
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	2,2	8,6	1,9	5,6
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	6,9	12	6,7	9
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	4,5	10	4,3	7,3
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	2,2	8,2	1,9	5,6
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	7,8	13	7,6	9,9
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	5	10	4,7	7,7
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	2	8,2	1,7	7,3
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	6,9	11	6	10
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	0,00805	0,0146	1,32	4,39
	Somme I du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	1,53	6,68	0,0028	0,013
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	7,11	11	7,01	8,77
	Somme II du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,011	0,0443	0,00605	0,0355
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	0,011	0,583	4,17	6,58
	Somme III du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	4,32	8,86	0,022	0,0355

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions F.N. Pickett & Fils, *B-Factory* à Westroozebeke (Flandre, Belgique) (laboratoire Wessling)

	Usine FN Pickett & Fils *B-Factory* de Westroosebeke (Flandre, Belgique)				
	Paramètre	Unité	Sols de surface [0-0,01 m]		
			POEL 1	POEL 2	TEM
			Aire de Brûlage		Témoin
			juil-17	juil-17	juil-17
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	8	10	<1,0
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	17	34	<2,0
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	11	21	<3,0
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	20	48	<3,0
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	18	38	<3,0
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	94	180	<15
	Octa CDD	ng/kg MS	160	250	61
	Somme des tetra CDD	ng/kg MS	**1 100**	**2 400**	13
	Somme des penta CDD	ng/kg MS	450	**1 200**	10
	Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	270	750	<30
	Somme des hepta CDD	ng/kg MS	170	330	20
	Somme des TCDD restants	ng/kg MS	**1 100**	**2 400**	12
	Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	430	**1 200**	10
	Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	220	640	<30
	Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	81	150	20
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	120	92	3,2
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	79	81	3,0
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	95	98	3,6
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	120	130	6,5
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	83	91	3,8
	2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	80	94	3,7
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	13	11	<3,0
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	310	370	23
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	77	83	<15
	Octa CDF	ng/kg MS	990	**1 200**	70
	Somme des tetra CDF	ng/kg MS	**1 900**	**2 000**	58
	Somme des penta CDF	ng/kg MS	**1 000**	**1 100**	38
	Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	760	890	41
	Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	580	690	39
	Somme des TCDF restants	ng/kg MS	**1 800**	**1 900**	55
	Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	830	940	31
	Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	460	560	27
	Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	190	240	16
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	**2 200**	**4 900**	110
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	**5 200**	**5 900**	250
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	**7 400**	**11 000**	350
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	120	140	4
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	120	140	7,5
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	120	140	5,8
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	130	160	3,9
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	130	160	8,4
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	130	160	6,2
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	130	170	4,1
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	130	170	7,1
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	108	135	3,16
	Somme I du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,242	0,234	0,00682
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	108	135	7,66
	Somme II du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	0,668	0,747	0,0238
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	108	135	5,41
	Somme III du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	2,31	2,8	0,178
	Fraction [PCDF] / [PCDD + PCDF] (teneurs ng/kg MS / ng / kg MS)		0,70	0,54	0,71

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF), métaux et métalloïdes et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. Site de destruction de munitions du Ravin du Chaufour à Douaumont (département de la Meuse) (laboratoire Wessling)

	Site RICOME du Ravin du Chauffour (Meuse). Destruction de munitions 14-18, 39-45 et années 60 (OTAN)				
	Désignation d'échantillon		**LOUV-1**	**LOUV-2**	**LOUV-3**
	Typologie	**Unité**	Résidu de brûlage noirâtre renfermant une forte densité d'obus de 20 mm calcinés	Résidu de brûlage noirâtre	Sol argilo-sableux du dépôt de blocs fumigènes d'obus américain de 90 mm enfouis
Métaux, métalloïdes et matière sèche	Matière sèche	% mass MB	66,4	48,3	62,9
	Métaux et métalloïdes				
	Mercure (Hg)	mg/kg MS	**5,1**	**9,1**	0,4
	Arsenic (As)	mg/kg MS	34	46	16
	Cadmium (Cd)	mg/kg MS	**860**	**500**	7,3
	Cuivre (Cu)	mg/kg MS	**11 000**	**66 000**	140
	Étain (Sn)	mg/kg MS	220	310	19
	Plomb (Pb)	mg/kg MS	**4 600**	**4 900**	50
	Zinc (Zn)	mg/kg MS	**25 000**	**43 000**	**12 000**
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	Naphtalène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Acénaphtylène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Acénaphtène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Fluorène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Phénanthrène	mg/kg MS	0,24	<0,1	<0,1
	Anthracène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Fluoranthène (*)	mg/kg MS	0,39	<0,1	<0,1
	Pyrène	mg/kg MS	0,32	<0,1	<0,1
	Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Chrysène	mg/kg MS	0,21	<0,1	<0,1
	Benzo(b)fluoranthène (*)	mg/kg MS	0,21	<0,1	<0,1
	Benzo(k)fluoranthène (*)	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Benzo(a)pyrène (*)	mg/kg MS	0,24	<0,1	<0,1
	Dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	<0,1	<0,1	<0,1
	Benzo(ghi)pérylène (*)	mg/kg MS	0,32	<0,1	<0,1
	Indéno(123-cd)pyrène (*)	mg/kg MS	0,21	<0,1	<0,1
	Somme des HAP	mg/kg MS	2,1	-/-	-/-
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	81	91	-
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	200	210	-
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	170	180	-
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MS	320	270	-
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	270	230	-
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	2300	1800	-
	Octa CDD	ng/kg MS	3800	3100	-
	Somme des tetra CDD	ng/kg MS	2700	2200	-
	Somme des penta CDD	ng/kg MS	3200	2900	-
	Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	3800	3500	-
	Somme des hepta CDD	ng/kg MS	4200	3600	-
	Somme des TCDD restants	ng/kg MS	2600	2100	-
	Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	3000	2700	-
	Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	3100	2800	-
	Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	2000	1700	-
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	690	660	-
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	850	710	-
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	1900	1900	-
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	1400	1300	-
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MS	1300	1100	-
	2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MS	1800	1600	-
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	130	110	-
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MS	5300	4200	-
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	530	380	-
	Octa CDF	ng/kg MS	3300	2200	-
	Somme des tetra CDF	ng/kg MS	17000	14000	-
	Somme des penta CDF	ng/kg MS	16000	14000	-
	Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	14000	11000	-
	Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	7900	6100	-
	Somme des TCDF restants	ng/kg MS	16000	14000	-
	Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	13000	11000	-
	Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	9400	7200	-
	Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	2100	1600	-
Valeurs calculées	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	**18000**	**15000**	-
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	**58000**	**48000**	-
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	**76000**	**63000**	-
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	1900	1800	-
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	1900	1800	-
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	1900	1800	-
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	2000	1900	-
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	2000	1900	-
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	2000	1900	-
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	1600	1400	-
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	1600	1400	-
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	1 590	1 490	-
	Somme I du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	2,92	2,82	-
	Somme II du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	9,26	8,3	-
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	1 590	1 490	-
	PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	1 590	1 490	-
	Somme III du décret allemand sur l'interdiction de produits chimiques	µg/kg MS	24,5	19,9	-

Dioxines & Furanes chlorées (PCDD & PCDF). Site de destruction de munitions modernes SIMT à Saint-Martin-de Crau (département des Bouches-du-Rhône) (laboratoire Wessling)

	Désignation d'échantillon	Site SIMT à Saint-Martin-de-Crau (Bouches - du - Rhône). Destruction de munitions années 80,						
		Unité		AIR-BAG 1	AIR-BAG 2	SOUTE	BRU-01	CART
				Alvéole de brûlage d'Air-bags		Soute de brûlage	Grillage de cartouches	
	Matière sèche	%	MB	90,70	92,60	93,2	96,1	95
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)	2,3,7,8 TCDD	ng/kg	MS	98,44	7,61	369,2	1,84	2,82
	1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg	MS	147,92	30,96	**1 564,2**	5,15	7,21
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg	MS	43,24	32,25	**1 357,6**	4,54	6,56
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg	MS	107,18	76,32	**3 398,3**	18,55	13,37
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg	MS	109,99	57,60	**2 709,2**	13,99	11,32
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg	MS	345,94	478,08	**23 477,9**	172,92	109,27
	Octa CDD	ng/kg	MS	463,65	838,49	**26 783,0**	398,41	212,94
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	2,3,7,8 TCDF	ng/kg	MS	268,06	71,57	**1 558,8**	7,42	31,31
	1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg	MS	270,56	78,84	**2 274,0**	7,63	22,66
	2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg	MS	429,73	182,41	**4 407,0**	10,98	57,17
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg	MS	314,35	198,75	**4 556,5**	22,43	34,39
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg	MS	343,61	186,10	**4 328,4**	17,75	29,84
	2,3,4,6,7,8 HxCDF	ng/kg	MS	460,40	332,21	**6 692,8**	25	53,71
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg	MS	26,81	26,90	618,9	< 3	4,87
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg	MS	**1 058,24**	**1 101,52**	**18 282,8**	179,47	108,47
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg	MS	75,07	104,12	**2 316,1**	23,68	< 15
	Octa CDF	ng/kg	MS	676,37	**1 679,18**	**9 770,7**	605,05	151,29
Valeurs calculées	Somme des tetra CDD	ng/kg	MS	**2 225,41**	462,87	**21 244,4**	59,28	96,15
	Somme des penta CDD	ng/kg	MS	**1 986,01**	725,05	**29 289,7**	58,32	98,57
	Somme des Hexa CDD	ng/kg	MS	**1 351,31**	**1 007,08**	**47 873,3**	155,86	126,39
	Somme des hepta CDD	ng/kg	MS	752,51	957,84	**45 257,7**	294,99	193,82
	Somme des tetra CDF	ng/kg	MS	**8 866,28**	**1 739,99**	**38 422,0**	173,17	768,74
	Somme des penta CDF	ng/kg	MS	**6 194,02**	**2 282,28**	**46 855,7**	144,66	524,15
	Somme des Hexa CDF	ng/kg	MS	**3 353,96**	**1 655,86**	**40 285,9**	183,24	328,07
	Somme des Hepta CDF	ng/kg	MS	**1 493,78**	**1 646,00**	**29 463,1**	309,23	179,08
	Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg	MS	**6 778,89**	**3 991,33**	**170 448,1**	966,86	727,87
	Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg	MS	**20 584,41**	**9 003,31**	**164 797,4**	**1415,35**	**1951,33**
	Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg	MS	**27 363,30**	**12 994,64**	**335 245,5**	**2382,21**	**2679,2**
	I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg	MS	584,09	235,76	**6 467,8**	26,02	57,22
	I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg	MS	584,09	235,76	**6 467,8**	26,32	57,37
	I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg	MS	584,09	235,76	**6 467,8**	26,17	57,3
	TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg	MS	657,02	248,98	**7 217,1**	27,69	60,5
	TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg	MS	657,02	248,98	**7 217,1**	27,99	60,65
	TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg	MS	657,02	248,98	**7 217,1**	27,84	60,57
	TE-BGA excl. LOQ	ng/kg	MS	580,89	221,19	**6 125,1**	26,57	49,43
	TE-BGA incl. LOQ	ng/kg	MS	580,89	221,19	**6 125,1**	26,87	49,58
	Somme I du "Chemikalienverbotsverordnung"	µg/kg	MS	0,94	0,29	7,9	0,03	0,1
	Somme II du "Chemikalienverbotsverordnung" alleman	µg/kg	MS	2,62	1,28	33,8	0,14	0,28
	Somme III du "Chemikalienverbotsverordnung" allema	µg/kg	MS	5,24	5,48	114,5	1,51	0,86
	TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg	MS	565,89	211,42	6 297,5	25,54	48,68
	TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg	MS	565,89	211,42	6 297,5	25,84	48,83
	TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg	MS	565,89	211,42	6 297,5	25,69	48,76
	Somme des HpCDD restants	ng/kg	MS	406,57	479,76	**21 779,8**	122,07	84,55
	Somme des HxCDD restants	ng/kg	MS	**1 090,90**	840,91	**40 408,2**	118,78	95,14
	Somme des PeCDD restants	ng/kg	MS	**1 838,09**	694,09	**27 725,5**	53,17	91,36
	Somme des TCDD restants	ng/kg	MS	**2 126,97**	455,26	**20 875,2**	57,44	93,33
	Somme des HpCDF restants	ng/kg	MS	360,47	440,36	**8 864,2**	106,08	70,61
	Somme des HxCDF restants	ng/kg	MS	**2 208,79**	911,90	**24 089,4**	118,06	205,26
	Somme des PeCDF restants	ng/kg	MS	**5 493,73**	**2 021,03**	**40 174,8**	126,05	444,32
	Somme des TCDF restants	ng/kg	MS	**8 598,22**	**1 668,42**	**36 863,2**	165,75	737,43

ANNEXE H

Résultats analytiques des composés nitrés des campagnes nationales et régionales de recherche des résidus d'explosif de l'ANSES (2020-2022) pour les régions Grand'Est et Hauts-de-France. Echantillons présentant au moins un positif (laboratoire LHN, ANSES)

Campagne nationale (points avec au moins une quantification) (laboratoire LHN, ANSES)

Date du prélèvement	Commune	Département	Région	Nature des eaux	1,2-Dinitrobenzène	2-Nitrophénol	2-Nitrotoluène	3-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	2,4,6-Trinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-	Diphénylamine	Somme des NT	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques	Ratio ∑DNT/∑NA	Ratio ∑2,6-DNT/∑DNT
	Abréviation				1,2-DNB	2-NP	2-NT	3-NT	4-NT	2,3-DNT	2,4-DNT	3,4-DNT	2,6-DNT	2,4,6-TNT	∑ADNT	DPA	∑NT	∑DNT	∑NA		
	Unité				ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L		
	Limite de quantification (LQ)				20	20	2	10	5	2	5	5	1	20	10	5	-	-	-	-	-
08/03/2021	Dontrien	Marne	Grand'Est	Eau brute	<	<	<	<	<	<	26	<	2,3	<	n.m.	<	<	28	28,3	100%	8%
08/03/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	26	<	2,3	<	<	<	<	28	28,3	100%	8%
08/03/2021	Souain Perthes-les-Hurlus			Eau brute	<	<	3,9	<	<	16	9,4	14	60	<	<	<	3,9	99	103	96%	60%
08/03/2021				Eau distribuée	<	<	4,8	<	<	18	10	16	62	<	<	<	4,8	106	111	96%	58%
12/01/2021	Blotzheim	Haut-Rhin		Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	7,6	<	<	<	-	-
31/03/2021	Ornes	Meuse		Eau brute	<	<	<	<	<	2,7	11	<	6,4	<	61	<	<	20	81,1	25%	32%
25/10/2021	Angomont	Meurthe-et-Moselle		Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	8,7	<	<	<	<	8,7	8,7	100%	100%
25/10/2021	Angomont			Eau brute	<	<	<	<	<	<	10	8,8	50	<	<	<	<	69	68,8	100%	73%
25/10/2021	Angomont			Eau brute	<	<	3,3	<	<	8	<	17	110	<	<	<	3,3	135	138	98%	81%
25/10/2021	Angomont			Eau brute	<	<	3,7	<	5,1	19	24	67	130	<	<	<	8,8	240	249	96%	54%
25/10/2021	Brémenil			Eau distribuée	<	<	<	<	<	3,3	<	7,7	57	<	<	<	<	68	68	100%	84%
19/07/2021	Plouvain	Pas-de-Calais	Hauts-de-France	Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	3,6	<	32	<	<	3,6	35,6	10%	100%
19/07/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	<	<	4,1	<	<	<	<	4,1	4,1	100%	100%
19/07/2021	Hermies			Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	1,2	<	<	<	<	1,2	1,2	100%	100%
19/07/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	<	<	1,1	<	<	<	<	1,1	1,1	100%	100%
19/07/2021	Vendin-le-Viel			Eau brute	<	<	<	<	<	<	22	<	23	<	160	<	<	45	205	22%	51%
19/07/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	17	<	21	<	<	<	<	38	38	100%	55%
15/03/2021	Neufchâtel-sur-Aisne	Aisne		Eau brute	<	<	15	12	9,7	130	14	150	310	<	<	<	37	604	641	94%	51%
15/03/2021				Eau distribuée	<	<	23	18	15	180	19	220	400	<	<	<	56	819	875	94%	49%
15/06/2021	Précy-sur-Oise	Oise		Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	<	68	<	<	<	<	68	-	-
15/06/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	<	<	<	28	<	<	<	<	28	-	-
31/05/2021	Guerbigny	Somme		Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	1,7	<	<	<	<	1,7	1,7	100%	100%
31/05/2021				Eau distribuée	<	<	<	<	<	<	<	<	1,6	<	<	<	<	1,6	1,6	100%	100%
31/05/2021	Curlu			Eau brute	<	<	<	<	<	<	<	<	1,6	<	<	<	<	1,6	1,6	100%	100%
31/05/2021				Eau distribuée	<	25	4,7	<	<	<	<	<	1,6	<	12	<	4,7	1,6	43,3	4%	100%
31/05/2021	Cramont			Eau distribuée	23	<	<	<	<	5,8	5,2	8,9	12	<	50	<	<	32	105	30%	38%
31/05/2021				Eau brute	22	<	<	<	<	5,8	5,1	9,1	11	<	53	<	<	31	106	29%	35%

<	Inférieur à la limite de quantification (LQ)
x	Détecté, quantifié <10 ng/L
xx	Détecté, quantifié ≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xxx	Détecté, quantifié ≥ 100 ng/L

Campagne régionale PRSE3, 2022 (points avec au moins une quantification) (laboratoire LHN, ANSES)

Date du prélèvement	Commune	Département	Nature de l'échantillon	Unité	1,3,5-Trinitro-hexahydro-1,3,5-triazine (RDX)	2-Nitroaniline	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2-nitrophénol	1,2-dinitrobenzène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-	2,4,6-trinitrotoluène	Diphénylamine	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques	%DNT /nitroaromatiques	%2,6-DNT /DNT
Abréviation					RDX	2-NA	2-NT	4-NT	2-N P	1.2DNB	2,3-DNT	2,4-DNT	2,6-DNT	3,4-DNT	∑ADNT	2,4,6-TNT	DPA	∑DNT	∑NA	-	-
Limite de quantification					10	10	2	5	20	20	2	5	1	5	10	20	5	-	-	-	-
01/06/2022	Wintzenheim	Haut-Rhin	Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	13	<	<	-	-
13/06/2022	Lhuître	Aube	Eaux souterraines	ng/L	16	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-	-
14/06/2022			Eaux souterraines	ng/L	<	13	<	<	<	<	<	<	2,2	<	16	<	<	2,2	31,2	7,1%	100,0%
14/11/2022	Azannes-et-Soumazannes	Meuse		ng/L	<	10	<	<	<	<	<	<	1,7	<	11	<	<	1,7	22,7	7,5%	100,0%
14/11/2022				ng/L	<	10	<	<	<	<	<	<	1,6	<	< 10	<	<	1,6	11,6	13,8%	100,0%
14/06/2022	Douaumont-Vaux			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	11	<	<	<	11	-	-
14/06/2022	Ornes			ng/L	<	<	<	<	<	<	4,5	13	9,5	5,1	86	<	<	32,1	118,1	27,2%	29,6%
14/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	3,6	10	5,5	<	100	<	<	19,1	119,1	16,0%	28,8%
14/06/2022	Gremilly			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	1,7	<	< 10	<	<	1,7	1,7	100,0%	100,0%
14/06/2022	Landrecourt - Lempire			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	10	<	< 10	<	<	10	10	100,0%	100,0%
30/05/2022	Malancourt			ng/L	<	<	<	<	<	<	9,5	6,2	6,3	<	21	<	<	22	43	51,2%	28,6%
14/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	2	<	<	<	< 10	<	<	2	2	100,0%	-
14/06/2022	Belrupt-en-Verdunois			ng/L	14	<	<	<	<	<	<	<	<	<	< 10	<	<	-	-	-	-
15/06/2022	Les Eparges			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	1,7	<	18	<	<	1,7	19,7	8,6%	100,0%
30/05/2022	Varennes-en-Argonne			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	5,8	<	< 10	<	<	5,8	5,8	100,0%	100,0%
30/05/2022	Clermont-en-Argonne			ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	< 10	<	12	-	-	-	-
14/11/2022	Etain		Eaux distribuées	ng/L	<	<	<	<	<	<	3,7	9,8	5,6	<	< 10	<	< 5	19,1	19,1	100,0%	29,3%
05/07/2022	Longuyon	Meurthe-et-Moselle	Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	1,5	<	,n.m	<	,n.m	1,5	1,5	100,0%	100,0%
05/07/2022	Angomont		Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	2,8	9,6	54	8,7	<	<	<	75,1	75,1	100,0%	71,9%
15/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	7,3	<	<	<	<	7,3	7,3	100,0%	100,0%
05/07/2022				ng/L	<	<	3,5	<	<	<	10	< 5	123	17	<	<	<	150	153,5	97,7%	82,0%
15/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	<	5,5	44	5	<	<	<	54,5	54,5	100,0%	80,7%
05/07/2022				ng/L	<	<	4,1	<	<	<	25	26	120	63	<	<	<	234	238,1	98,3%	51,3%
15/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	13	<	110	19	<	<	<	142	142	100,0%	77,5%
05/07/2022	Brémenil		Eaux distribuées	ng/L	<	<	<	<	<	<	6,4	<	72	11	<	<	<	89,4	89,4	100,0%	80,5%
15/11/2022				ng/L	<	<	<	<	<	<	6,4	<	79	11	<	<	<	96,4	96,4	100,0%	82,0%
21/06/2022	Mourmelon-le-Grand	Marnes	Eaux souterraines	ng/L	59	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-	-	-	-
22/11/2022				ng/L	63	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-	-	-	-
22/11/2022			Eaux distribuées	ng/L	96	,n.m	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-	-	-	-
21/06/2022	Souain Perthes-lesHurlus		Eaux distribuées	ng/L	<	<	3,4	<	<	<	13	7,7	46	9,4	<	<	<	76,1	79,5	95,7%	60,4%
21/06/2022			Eaux souterraines	ng/L	<	<	3,6	<	<	<	14	8,4	47	11	<	<	<	80,4	84	95,7%	58,5%
22/11/2022			Eaux souterraines	ng/L	<	<	4	<	<	<	19	7	76	12	<	<	<	114	118	96,6%	66,7%
22/11/2022			Eaux distribuées	ng/L	<	<	4,3	<	<	<	18	7,1	51	12	<	<	<	88,1	92,4	95,3%	57,9%
21/06/2022	Puiseulx		Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	10	<	<	<	<	10	10	100,0%	100,0%
21/06/2022	Vaudemange		Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	1,6	<	<	<	<	1,6	1,6	100,0%	100,0%
20/06/2022	Vienne-le-château		Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	1	<	<	<	<	1	1	100,0%	100,0%
20/06/2022	Witry-les-Reims		Eaux souterraines	ng/L	<	<	<	<	<	<	<	<	< 1	<	<	<	13	-	-	-	-
21/06/2022	Juniville	Ardennes	Eaux souterraines	ng/L	<	n.m.	<	<	<	<	<	<	1,3	<	<	<	n.m.	1,3	1,3	100,0%	100,0%

<	Inférieur à la limite de quantification (LQ)
x	Détecté, quantifié <10 ng/L
xx	Détecté, quantifié ≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xxx	Détecté, quantifié ≥ 100 ng/L

ANNEXE I

Résultats analytiques sur les eaux souterraines et de surface des études sectorielles

Résultats analytiques sur les eaux souterraines. Etudes sectorielles de l'Argonne (départements de la Marne et de la Meuse) et de Vauquois (département de la Meuse)

Argonne. Composés inorganiques

Laboratoire	Echantillon / libélé	Secteur	Point de prélèvement	Date de prélèvement	T°C	cond	O_2	pH	Eh	ClO_3 -	ClO_4-	NO_3-	NO_2-	NH_4^+	Cl-	SO_4^{2-}	PO_4-	F	HCO_3-	CO_3-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+
					°C	µS/cm	%	-	mV	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
BRGM	GRU1	Argonne Gruerie	Source Gruerie	10/06/2019	12,0	204,0	85,8	7,192	317,0	< 5	**0,8**	6,2	-	<0,05	6,3	10,9	0,1	-	87	-	27,1	4,2	2,1	1,4
BRGM	GRU2	Argonne Gruerie	Source Gruerie	10/06/2019	9,8	189,8	93,8	7,295	231,5	< 5	**0,8**	2,9	-	<0,05	5,0	12,7	< 0,1	-	81	-	25,0	3,8	1,8	1,4
BRGM	HARA	Argonne	La Harazée, source	10/06/2019	12,3	222,0	82,6	7,308	213,6	< 5	**6,4**	1,3	-	<0,05	7,1	10,3	< 0,1	-	104	-	32,0	4,2	1,8	1,5
BRGM	LAV HARA	Argonne	La Harazée, source	10/06/2019	12,4	274,0	92,5	7,832	184,2	< 5	**4,8**	5,6	-	<0,05	4,9	14,2	< 0,1	-	130	-	41,5	4	1,8	1,4
BRGM	CIM HARA	Argonne	La Harazée, source	10/06/2019	9,9	188,8	44,4	6,745	296,9	< 5	**3,7**	4,2	-	<0,05	5,6	15,5	< 0,1	-	73	-	23,6	4,5	2,1	1,4
BRGM	HARA1	Argonne	La Harazée, source	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**13,5**	3,8	-	<0,05	7,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	HARA2	Argonne	La Harazée, source	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**10,2**	3,7	-	<0,05	7,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	MITTE	Argonne	La Harazée, source	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**9,2**	10,5	-	<0,05	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	BRET	Argonne	La Harazée, source La Bretonne	13/02/2019	10,1	201,0	97,4	7,258	289,2	**1,9**	**4,6**	7	-	<0,05	5,3	14,5	0,09	-	-	-	34,9	3,5	1,8	1,5
BRGM	Galerie A	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie allemande	11/06/2019	9,9	114,1	44,2	5,553	242,0	< 5	**0,8**	2,7	-	<0,05	5,9	16,5	< 0,1	-	20	-	9,0	4,4	1,2	2,2
BRGM	Galerie G	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie allemande	11/06/2019	10,0	129,1	57,1	5,820	274,6	**19**	**3,3**	5,5	-	<0,05	7,8	27	< 0,1	-	< 10	-	10,4	4,9	1,3	2,6
BRGM	Galerie TEDDY	Argonne, Fille Morte	Galerie allemande	11/06/2019	12,0	139,8	66,5	5,786	229,9	**13**	**43,9**	9	-	<0,05	7,3	18,5	< 0,1	-	14	-	10,3	5,3	1,2	2,3
BRGM	A3	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie allemande	15/10/2021	-	-	-	-	-	**5150**	**58,6**	5,6	-		13,1	-	-	-	-	-	-	7,5	-	3,2
BRGM	F28	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie française	15/10/2021	-	-	-	-	-	**93700**	**42,1**	<0,5	-	<0,05	12,5	-	-	-	-	-	-	35,6	-	3,6
BRGM	CRIS	Argonne, Bois Varin (nord)	Source, Fontaine Cristalline	13/06/2019	10,3	152,5	91,0	6,880	368,0	< 5	**0,6**	2,7	-	<0,05	4,8	16,8	< 0,1	-	51	-	19,2	3,6	1,5	1,4
BRGM	MOR	Argonne, Bois Varin (nord)	Source, Fontaine du Mortier	13/06/2019	10,0	128,1	93,5	6,677	375,6	< 5	< 0,5	4,2	-	<0,05	5,3	12,6	< 0,1	-	39	-	14,7	3,8	1,4	1,2
BRGM	LACH 1	Argonne	Source, Lachalade	12/02/2019	9,9	104,5	99,3	7,391	226,4	< 5	< 0,5	**690,3**	-	<0,05	4,1	5,5	0,15	-	-	-	15,5	2,5	0,7	1,2
BRGM	LACH 2	Argonne	Source, Lachalade	12/02/2019	9,9	89,3	98,1	7,090	241,8	**0,5**	< 0,5	7,7	-	<0,05	3,6	6,8	0,11	-	-	-	13,4	2,4	0,7	0,8
BRGM	FP1	Argonne	Four de Paris. Fontaine du Four de Paris	12/02/2019	9,0	160,3	92,7	7,520	219,3	**64,3**	**123**	16,4	-	<0,05	5,2	12,3	< LQ	-	-	-	27,2	3,1	1,6	1,2
BRGM	F PARIS	Argonne	Four de Paris. Fontaine du Four de Paris	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**5,8**	6,1	-	<0,05	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	FP2	Argonne	Four de Paris	12/02/2019	9,5	141,7	99,0	7,601	213,8	**2,2**	**21**	16,2	-	<0,05	4,2	8,4	0,11	-	-	-	22,7	3,1	1	1,1
BRGM	FP3	Argonne	Four de Paris	12/02/2019	9,9	144,4	97,8	7,196	288,2	**3**	**16**	12,7	-	<0,05	4,4	9,5	0,11	-	-	-	23,4	3,3	1,3	1,1
BRGM	FP4	Argonne	Four de Paris	12/02/2019	9,9	125,8	97,5	6,912	225,1	**3,1**	**32**	10,7	-	<0,05	4,3	8,9	0,09	-	-	-	19,4	3,6	1,1	1,2
BRGM	FP5	Argonne	Four de Paris	12/06/2019	11,3	336,0	88,7	7,680	276,4	**21**	**111,4**	12,9	-	<0,05	6,1	24,3	< 0,1	-	144	-	50,5	3,3	3,2	2,2
BRGM	FP5	Argonne	Four de Paris	13/02/2019	9,8	263,0	95,0	7,698	282,1	**20,7**	**53,4**	23,7	-	<0,05	5,1	14,7	0,7	-	-	-	47,4	3,5	2,7	2
BRGM	208	Argonne version meusien	Source, Benne	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**0,7**	2,3	-	<0,05	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	PRE RA	Argonne version meusien	Source, Fontaine du Pré Ramont	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	3,0	-	0,060	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	MOLLU	Argonne version meusien	Source, Le Mollu	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	7,7	-	<0,05	4,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	PERCE	Argonne version meusien	Source, Ravin de Perceval	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**2,0**	4,2	-	<0,05	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	PER2	Argonne version meusien	Source, Ravin de Perceval	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**3,6**	5,7	-	<0,05	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	PER	Argonne version meusien	Source, Ravin de Perceval	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**4,0**	2,2	< 0,01	<0,05	4,4	12,8	0,2	< 0,1	61	< 10	23,1	3,3	1,2	1,5
ANSES	PER	Argonne version meusien	Source, Ravin de Perceval	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	**3,9**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	CHE2	Argonne version meusien	Source de la Cheppe	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	< 0,5		0,230	4,6									
BRGM	CHE	Argonne version meusien	Source de la Cheppe	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**1,9**	3,2	< 0,01	<0,05	4,1	18,7	0,16	< 0,1	104	< 10	38,7	3	2,4	1,8
BRGM	CHE	Argonne version meusien	Source de la Cheppe	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**1,9**	3,2	< 0,01	<0,05	4,1	18,7	0,16	< 0,1	104	< 10	38,7	3	2,4	1,8
ANSES	CHE	Argonne version meusien	Source de la Cheppe	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ANSES	CHE	Argonne version meusien	Source de la Cheppe	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	ROB	Argonne version meusien	Source, Fontaine Robinson	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**1,5**	3,7	< 0,01	<0,05	4,6	14,5	0,09	< 0,1	60	< 10	23,5	3,3	1,5	1,6
ANSES	ROB	Argonne version meusien	Source, Fontaine Robinson	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ANSES	ROB	Argonne version meusien	Source, Fontaine Robinson	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	FONT MEU	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fontaine des Meurrissons	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	8,3	-	<0,05	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	MEU	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fond des Meurrissons, Croix Monier	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**15,7**	3,3	< 0,01	<0,05	5,1	18,2	0,13	< 0,1	54	< 10	22,6	3,7	2	1,8
ANSES	MEU	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fond des Meurrissons, Croix Monier	14/06/2017	-	-	-	-	-	**12,2**	**12,9**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ANSES	MEU	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fond des Meurrissons, Croix Monier	14/06/2017	-	-	-	-	-	**10,4**	**13,1**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	CHEV2	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fontaine aux Chevaux	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**1,3**	7,0	-	<0,05	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	CHEV	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fontaine aux Chevaux	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	**2,4**	3,0	< 0,01	<0,05	6,0	20,8	0,11	< 0,1	73	< 10	28,9	4,2	2,5	2,1
ANSES	CHEV	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fontaine aux Chevaux	14/06/2017	-	-	-	-	-	**11,9**	**2,25**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ANSES	CHEV	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Fontaine aux Chevaux	14/06/2017	-	-	-	-	-	**12,2**	**2,32**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	BOL	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Bolante	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 50	< 0,5	1,7	< 0,01	<0,05	5,4	13,6	0,13	< 0,1	109	< 10	37,1	4,6	2,6	1,7
ANSES	BOL	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Bolante	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ANSES	BOL	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Bolante	14/06/2017	-	-	-	-	-	< 10	< 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	BOL	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Bolante	12/02/2019	9,4	115,6	92,1	6,943	253,5	< 5	**0,6**	6,6		<0,05	3,9	8,1	0,09	-	-	-	18,2	3	0,9	1
BRGM	MEU	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	-	-	-	-	-	< 5	**8,1**	7,6	-	<0,05	4,7	11,2	0,07	-	-	-	11	3,3	0,9	1,4
BRGM	MEU BAS	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	-	-	-	-	-	**1,3**	**24**	9,2	-	<0,05	4	11,8	0,1	-	-	-	15,9	2,9	1	1,4
BRGM	MEURI 1	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	8,6	-	<0,05	6,8	8,3	< LQ	-	-	-	11,9	4,2	0,9	1,1
BRGM	MEURI 2	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	9,3	151,6	99,0	6,993	255,5	< 5	< 0,5	16,5	-	<0,05	9,6	10,9	0,06	-	-	-	20,8	5,6	1,3	1,3
BRGM	MEURI 3	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	8,8	223,0		7,680	238,0	**1**	< 0,5	27,6	-	<0,05	9,2	13,9	0,07	-	-	-	36,7	3,8	1,4	1,3
BRGM	MEURI 4	Argonne, Haute Chevauchée	Source, Les Meurrissons	12/02/2019	9,6	92,0	97,4	6,367	285,7	< 5	**25,6**	9,1	-	<0,05	3,9	9,5	0,08	-	-	-	12,4	3,4	0,6	0,9
BRGM	C CHAUSSE	Argonne Courte Chausse	Source la Courte Chausse	20/07/2018	-	-	-	-	-	**20,0**	**7,3**	6,4	-	<0,05	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	CC FONT (2)	Argonne Courte Chausse	Fontaine	12/06/2019	10,1	394,0	87,2	7,560	287,8	**53**	**1,9**	4,3	-	<0,05	7,9	50,5	< 0,1	-	157	-	57,2	3,7	5,7	2,3
BRGM	CC Amont riv	Argonne Courte Chausse	Ruisseau de la Courte Chausse amont	12/06/2019	9,8	182,7	84,1	7,182	285,0	**7**	**0,7**	2,9	-	<0,05	5,3	16,8	< 0,1	-	72	-	25,1	3,7	1,5	1,4
BRGM	CC Aval riv	Argonne Courte Chausse	Ruisseau de la Courte Chausse aval	12/06/2019	11,1	197,4	80,3	7,172	328,8	< 5	< 0,5	3	-	<0,05	4,2	15,6	0,2	-	81	-	27,1	3,7	1,6	1,2
BRGM	CAMP	Argonne, Biesme rive gauche	Source du Camp	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	10,2	-	<0,05	5,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	FERDINAND	Argonne, Biesme rive gauche	Source Ferdinand	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	4,5	-	<0,05	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	H MORT	Argonne nord	Source, l'Homme mort	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	**0,6**	11,5	-	<0,05	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	APREMONT	Argonne nord	Source Pont de l'Aune	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 5	< 0,5	4,4	-	<0,05	4,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BRGM	ROBIN	Servon	Source, Vallée Robin	10/06/2019	10,3	148,4	16,2	6,5	-151,5	< 5	1,7	3,4		<0,05	4,2	8,9	< 0,1	-	56	-	18,5	2,8	1,4	1,3
BRGM	MOR	Servon	Camp Moreau	10/06/2019	-	-	-	-	-	< 5	< .5	4,2	-	<0,05	5,3	12,6	<0,1	-	-	-	14,7	3,8	1,4	1,2
BRGM	SERV1	Servon	Servon	10/06/2019	9,9	448,0	55,6	6,951	209,6	**5**	**4,6**	2,7	-	<0,05	8,5	26	0,2	-	216	-	70,7	4,5	3,4	1,6
BRGM	DAMG	Argonne	Neuvilly-en-Argonne	13/02/2019	8,5	466,0	92,4	7,635	194,0	< 5	< 0,5	28	-	<0,05	8,9	13,7	0,47	-	-	-	89,5	2,8	6,3	2,9

Vauquois. Composés inorganiques (laboratoire BRGM)

Echantillon / libélé	Point de prélèvement	Date de prélèvement	T°C	cond	O_2	pH	Eh	ClO_3 -	ClO_4-	NO_3-	NO_2-	NH_4^+	Cl-	SO_4^{2-}	PO_4-	F-	HCO_3-	CO_3-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+
			°C	µS/cm	%	-	mV	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
S' (galerie)	Galerie française	04/02/2020	-	-	-	-	-	**71**	**2,28**	**16,5**	<0,01	<0,05	3,4	7,6	3,94	< 0,10	-	-	-	-	-	-
S' gauche (galerie)	Galerie française	04/02/2020	-	-	-	-	-	**315**	0,92	3,7	0,02	<0,05	12,9	9,4	<0,10	< 0,10	-	-	-	-	-	-
KAMPF (galerie)	Galerie allemande *Kampfstollen*	04/02/2020	-	-	-	-	-	**243**	**5,29**	3,2	0,01	<0,05	8,0	12,3	2,13	< 0,10	-	-	-	-	-	-
OST (Galerie)	Galerie allemande *Oststollen*	01/07/2019	-	-	-	-	-	-	**6,1**	4	-	<0,05	19,6	10,8	2,4	< 0,1	277	-	65,9	17,1	5,6	20,3
RADER (Galerie)	Galerie allemande *Raderstollen*	01/07/2019	-	-	-	-	-	-	**152,8**	**41,8**	-	<0,05	28,7	87,8	1,6	< 0,1	200	-	90,2	22	3,4	9
FND VAUQ2	Source Fontaine Notre Dame (VAUQ2)	22/06/2023	-	-	-	-	-	**142 000**	**3,62**	<0,5	-	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FND	Source Fontaine Notre Dame (VAUQ2)	04/02/2020	-	-	-	-	-	**188**	**33,4**	5,6	<0,01	<0,05	10,7	20,9	0,21	< 0,10	-	-	-	-	-	-
VAUQ 2	Source Fontaine Notre Dame (VAUQ2)	11/02/2019	4,8	136,5	97,4	7,010	237,6	< 50	< 0,5	1,6	-	<0,05	4,2	7,2	< LQ	-	-	-	24,5	2,2	1,4	0,9
VAUQ2	Source Fontaine Notre Dame (VAUQ2)	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	**33,6**	7,8	-	<0,05	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LAV	Source Lavoir	23/06/2023	-	-	-	-	-	**372**	**7,3**	9,8	-	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LAV	Source Lavoir	04/02/2020	-	-	-	-	-	**160**	**3,4**	**22,8**	<0,01	<0,05	8,4	16,5	0,79	< 0,10	-	-	-	-	-	-
VAUQ1	Source, nord-est	23/06/2023	-	-	-	-	-	**176**	**0,86**	1	-	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VAUQ1	Source, nord-est	20/07/2018	-	-	-	-	-	**7,0**	**18,0**	3,0	-	<0,05	9,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VAUQ4	Source	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	**20,4**	11,7	-	<0,05	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VAUQ5	Source	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	< 0,5	< 0,5	-	<0,05	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ALLIEUX	Source Ferme des Allieux	13/02/2019	9,6	518,0	82,0	6,989	191,3	< 50	< 0,5	**26,3**	-	<0,05	4,1	14,1	0,39	-	-	-	107,5	3,1	3,1	1
BOUR	Source Boureuilles	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	**1,1**	6,5	-	<0,05	3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MAIZE	Source La Maize	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	< 0,5	7,8	-	<0,05	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETONRU	Source Etonru	20/07/2018	-	-	-	-	-	< 50	< 0,5	**15,1**	-	<0,05	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Composés nitroaromatiques (laboratoire LHN, ANSES)

Composé	Laboratoire. Méthode	Origine, famille	Acronyme	Unité	Fontaine Cristalline	Fontaine du Mortier	CC amont riv	CC Font	Gruerie 1	Gruerie 2	Four de Paris (FP5)	Galerie A	Galerie G	Teddy (galerie)	Galerie ERDA (France)	Galerie A3 (Allemagne)	Galerie F28 (France)	LAV (Lavoir)	LAV (Lavoir)	LAV2 (Lavoir)	FND (Fontaine Notre Dame)	FND (Fontaine Notre Dame)	VAUQ1	RADER (Raderstollen, galerie allemande)	OST (Oststollen, galerie allemande)
					Gruerie		Courtes Chausses		Gruerie		Four-de-Paris	Fille Morte			Corniche	Haute - Chevauchée		Vauquois							
					01/07/2019										01/07/2020	01/10/2021		01/07/2019	01/06/2023	01/06/2023	01/07/2019	01/06/2023	01/06/2023	01/07/2019	
2-Nitrotoluène	ANSES LHN. SBSE - GC-MS MS	Intermédiaire de synthèse DNT TNT	2-NT	ng/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<2	10	7	4	15	30	Traces	64	3	2	1
3-Nitrotoluène			3-NT	ng/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<10	21	13	<10	31	83	<10	120	< 10	< 5	< 5
4-Nitrotoluène			4-NT	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<5	9	35	<5	110	300	<5	390	16	< 5	< 5
2,3-Dinitrotoluène		Explosif, propulseur (double base)	2,3-DNT	ng/L	<1	<1	<1	49	<1	<1	<1	<1	<1	<1	3,3	4	11	23	640	6 800	50	4 100	180	118	6
2,4-Dinitrotoluène			2,4-DNT	ng/L	<1	<1	<1	6	<1	<1	<1	<1	<1	24	<5	332	< 5	<5	12	9	<5	15	< 5	1 699	1 267
2,5-Dinitrotoluène			2,5-DNT	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<2	2	3	<2	65	400	47	220	19	14	6
2,6-Dinitrotoluène			2,6-DNT	ng/L	<1	<1	<1	30	<1	<1	<1	<1	<1	39	11	17	48	88	700	6 500	176	2 200	170	149	127
3,4-Dinitrotoluène			3,4-DNT	ng/L	<1	<1	<1	4	<1	<1	<1	<1	<1	<	<5	traces	traces	<5	6	42	<5	11	< 5	91	14
3,5-Dinitrotoluène			3,5-DNT	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<5	2	2	<5	71	320	<5	99	13	18	9
Somme des Amino-dinitrotoluènes		Métabolite du TNT	ADNT	ng/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	15	-	-	-	37	< 10	14	106	< 10	< 10	412	310
Somme des Diamino-nitrotoluènes			DANT	ng/L	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	-	-	-	<20	<20	<20	<20	<20	<20	135	182
2,4,6-Trinitrotoluène		Explosif	2,4,6-TNT	ng/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-	212	< 2	-	-	-	-	-	-	287	279
1,2-Dinitrobenzène		Explosif	1,2-DNB	ng/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-	< 20	< 20	<20	< 20	< 20	<20	< 20	< 20	240	168
1,3-Dinitrobenzène			1,3-DNB	ng/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	-	42	91	10	< 10	100	<10	23	11	2 692	2 336
1,4-Dinitrobenzène			1,4-DNB	ng/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	-	Traces	Traces	<20	< 20	< 20	<20	< 20	< 20	81	61
1-Nitronaphtalène		Intermédiaire de synthèse des DNN	1-NN	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	4	Traces	<2	< 2	6	<2	3	< 2	23	42
1,3-Dinitronaphtalène		Explosif	1,3-DNN	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	2	1	<1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	-	-
1,5-Dinitronaphtalène			1,5-DNN	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	< 10	< 10	<10	< 10	< 10	<10	< 10	< 10	15	7
1,6-Dinitronaphtalène			1,6-DNN	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	< 10	< 10	<10	< 10	< 10	<10	< 10	< 10	13	1
1,8-Dinitronaphtalène			1,8-DNN	ng/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	15	-	21	< 20	<20	< 20	< 20	<20	< 20	< 20	94	22
2-Nitrophenol		Intermédiaire de synthèse du DNP	2-NPh	ng/L	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	-	< 20	< 20	-	< 20	< 20	-	< 20	25	-	-
2-Nitroaniline		Explosif	2-NA	ng/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	-	< 20	< 20	<10	< 10	< 10	<10	< 10	< 10	26	34
Diphenylamine		Stabilisants des poudres nitrocellulosiques	DPA	ng/L	<1	3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	< 5	< 5	<5	< 5	< 5	<5	<5	<5	-	-

Résultats analytiques sur les eaux souterraines. Etude sectorielle du secteur du Col de La Chapelotte Allencombe (département de la Meurthe-et-Moselle).

Résultats analytiques (octobre 2017). Chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium (laboratoire BRGM)

Identifiant - Date d'échantillonnage	Indice national	Désignation	pH	T°C	conductivité électrique	redox	O_2	ClO_3^- (ion chlorate)	ClO_4^- (ion perchlorate)	NH_4^+ (ammonium exprimé en NH4)	NO_3^- (Nitrates exprimés en NO3)	Altitude (appr.) m NGF
Limite de quantification (LQ)	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,5	0,05	0,5	-
Unité	-	-	-	°C	µS/cm	mV	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	-
C03 - 10/10/2017	-	SOURCE DU MONUMENT	6,2	11	75,8	329,2	-	< LQ	< LQ	< LQ	2,6	-
C04 - 09/10/2017	-	SOURCE SOUS LA ROCHE AMONT-AEP ECART DE LA MENELLE	6	11	66,9	307,4	4,85	< LQ	< LQ	< LQ	1,3	450
C09 - 09/10/2017	-	SOURCE DES TRIPPES	7,4	11	11,6	189	4,89	< LQ	< LQ	< LQ	4,2	400
C13 - 11/10/2017	-	SOURCE D'ALLOMCOMBE - SOURCE A (1)	6,5	11	52,8	285,7	5,45	< LQ	< LQ	< LQ	4	370
C14 - 11/10/2017	-	SOURCE D'ALLENCOMBE - SOURCE D (4)	5,9	9,7	37,6	281,7	5,89	< LQ	**22,6**	< LQ	3,1	350
C16 - 10/10/2017	02706X0050	BASSE DE NABLOTTE - SOURCE S6 de la Nablotte (ancienne SOURCE 8 BIS)	6,9	11	84,6	269,9	5,08	< LQ	< LQ	< LQ	2,4	370
C18 - 10/10/2017	02706X0053	BASSE DE NABLOTTE - SOURCE 2	6,2	11	48,2	316	5,96	< LQ	< LQ	< LQ	2,2	-
C19 - 10/10/2017	02706X0055	BASSE DE NABLOTTE - SOURCE 1 (ANCIENNE SOURCE NABLOTTE N°2)	6	11	47,9	294,6	4,88	< LQ	< LQ	< LQ	2,4	400
C20 - 09/10/2017	02706X0056	LA BASSE DE L'AIGLE	6,4	11	33,7	307	3,87	< LQ	< LQ	< LQ	0,9	363
C24 - 09/10/2017	02706X0064	FONTAINE DE LA REPUBLIQUE	6,2	11	59,1	332	6	< LQ	< LQ	< LQ	4,3	450
C27 bis - 11/10/2017	-	-	6,3	11	79	352,4	5,26	< LQ	< LQ	< LQ	5,5	430
C38 - 09/10/2017	IGN-24	-	7,4	11	101,2	39,2	0,02	< LQ	< LQ	0,09	4,5	360
C41 - 10/10/2017	-	-	7,3	11	103,6	261	5,29	< LQ	< LQ	< LQ	3,5	-
C42 - 10/10/2017	-	-	7,6	11	109	228	4,22	< LQ	< LQ	< LQ	11,1	-
C47 - 10/10/2017	-	SOURCE BASSE DES BOUGES	5,9	11	80,8	302,8	-	< LQ	< LQ	< LQ	4,3	-
C48 - 09/10/2017	IGN-22	-	7,4	11	68	-62	1,09	< LQ	< LQ	0,09	0,5	-
C50 - 11/10/2017	02706X0092	SOURCE CAPTEE N°5 PRES D'ALLENCOMBE	6,6	11	59,5	267,8	5,8	< LQ	**21,6**	< LQ	4,2	-

Résultats analytiques (octobre 2018). Chlorate, perchlorate, cations, anions et éléments traces (laboratoire BRGM)

			26/06/2018			
Elément, composé	Limite de quatification (LQ)	Unité	Source C13	Source C14	Source C50	Source C51
ClO3- (chlorate)	5	µg/L	<	<	**7**	<
ClO4- (perchlorate)	0,5	µg/L	<	**27,3**	**19,3**	**1**
Al (aluminium)	0,5	µg/L	30,3	4,49	14,9	13,1
As (arsenic)	0,05	µg/L	0,53	0,52	0,3	0,26
Cd (cadmium)	0,01	µg/L	0,06	<	0,03	0,03
Cr (chrome)	0,1	µg/L	0,11	<	0,11	<
Hg (mercure)	15	µg/L	<	<	<	<
Pb (plomb)	0,05	µg/L	<	<	<	<
Se (Sélénium)	0,1	µg/L	<	<	<	<
Zn (zinc)	0,5	µg/L	3	1,11	1,5	0,7
B (bore)	0,5	µg/L	4,01	3,46	3,79	3,63
Br- (brome)	10	µg/L	11,9	10,1	10,6	10,2
Ca2+ (calcium)	0,5	mg/L	2,4	2,9	3,3	3,4
CO3- (carbonate)	10	mg/L	<	<	<	<
HCO3- (hydrogénocarbonate)	10	mg/L	<	<	<	<
Cl- (chlorure)	0,5	mg/L	2,3	2,3	3,1	1,8
I- (iodure)	1	µg/L	1,6	1,09	1,78	1,43
K+ (potassium)	0,5	mg/L	1,8	2	2	2
Li+ (lithium)	0,1	µg/L	0,46	0,53	0,48	0,46
Mg2+ (magnésium)	0,5	mg/L	1,1	0,5	0,08	0,8
NO3- (nitrate)	0,5	mg/L	3,1	3,1	3,6	4,7
Na+ (sodium)	0,5	mg/L	1,4	1,3	2	1,5
SO42- (sulfate)	0,5	mg/L	7,3	4	8,5	8,5

Chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium. Synthèse (2014-2022) (laboratoire BRGM)

Identifiant - Date d'échantillonnage	Source	pH	T°C	conductivité électrique	redox	O_2	ClO_3^- (ion chlorate)	ClO_4^- (ion perchlorate)	NH_4^+ (ammonium exprimé en NH4)	NO_3^- (Nitrates exprimés en NO3)	Laboratoire
Unité	-	-	°C	µS/cm	mV	mg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	-
07/07/2014	Source d'Allencombe - Source n°1 (A)	-	-	-	-	-	-	<	-	-	ARS 54
21/08/2014		-	-	-	-	-	-	<	-	-	ARS 54
11/10/2017		6,5	11	52,8	286	5,45	< 50	< 0,5	< 0,05	4	BRGM
25/10/2021		-	-	-	-	-	-	< 2	-	-	LHN ANSES
15/11/2022		-	-	-	-	-	-	< 2	-	-	LHN ANSES
21/08/2014	Source d'Allencombe - Source n°2 (B)	-	-	-	-	-	-	**1,5**	-	-	ARS 54
22/09/2014		-	-	-	-	-	-	**1,3**	-	-	ARS 54
25/10/2021		-	-	-	-	-	-	<2	-	-	LHN ANSES
15/11/2022		-	-	-	-	-	-	Traces	-	-	LHN ANSES
07/07/2014	Source d'Allencombe - Source n°3 (C)	-	-	-	-	-	-	**4,9**	-	-	ARS 54
21/08/2014		-	-	-	-	-	-	**5,3**	-	-	ARS 54
25/10/2021		-	-	-	-	-	-	**4**	-	-	LHN ANSES
05/07/2022		-	-	-	-	-	-	**4,2**	-	-	LHN ANSES
15/11/2022		-	-	-	-	-	-	**4,4**	-	-	LHN ANSES
07/07/2014	Source d'Allencombe - Source n°4 (D)	-	-	-	-	-	-	**23,9**	-	-	ARS 54
21/08/2014		-	-	-	-	-	-	**35,8**			ARS 54
11/10/2017		5,9	9,7	37,6	282	5,89	< 50	**22,6**	< 0,05	3.1	BRGM
25/10/2021		-	-	-	-	-	-	**25**	-	-	LHN ANSES
05/07/2022		-	-	-	-	-	-	**24**	-	-	LHN ANSES
15/11/2022		-	-	-	-	-	-	**27**	-	-	LHN ANSES
07/07/2014	Source d'Allencombe - Source n°5	-	-	-	-	-	-	**32,5**	-	-	ARS 54
21/08/2014		-	-	-	-	-	-	**30,1**	-	-	ARS 54
25/10/2021		-	-	-	-	-	-	**19**	-	-	LHN ANSES
05/07/2022		-	-	-	-	-	-	**18**	-	-	LHN ANSES

Composés nitroaromatiques (points avec au moins une quantification). Synthèse (2021-2022) (laboratoire LHN, ANSES)

Date de prélèvement	Commune	Point de prélèvement	Nature des eaux	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des nitroaromatiques (NA)	Somme des NT	Somme des DNT	Ratio [∑DNT]/[∑NA]
				2-NT	4-NT	2,3-DNT	2,4-DNT	2,6-DNT	3,4-DNT	∑NA	∑NT	∑DNT	
20-oct.-21	ANGOMONT	Source Allencombe n°1 (A)	Eau brute	< 2	< 5	< 2	< 5	< 1	< 5	<	<	<	-
15-nov.-22	ANGOMONT	Source Allencombe n°1 (A)	Eau brute	< 4	< 5	< 2	< 5	< 1	< 5	<	<	<	-
25-oct.-21	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°2 (B)	Eau brute	< 2	< 5	< 2	< 5	**8,7**	< 5	**8,7**	<	**8,7**	100,0%
15-nov.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°2 (B)	Eau brute	< 4	< 5	< 2	< 5	7,3	< 5	**7,3**	<	**7,3**	100,0%
25-oct.-21	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°3 (C)	Eau brute	< 2	< 5	< 2	**10**	**50**	**8,8**	**68,8**	<	**68,8**	100,0%
5-juil.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°3 (C)	Eau brute	< 2	< 5	**2,8**	**9,6**	**54**	**8,7**	**75,1**	<	**75,1**	100,0%
15-nov.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°3 (C)	Eau brute	< 4	< 5	< 2	**5,5**	**44**	**5**	**54,5**	<	**54,5**	100,0%
25-oct.-21	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°4 (D)	Eau brute	**3,3**	< 5	**8**	< 5	**110**	**17**	**138,3**	**3,3**	**135**	97,6%
5-juil.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°4 (D)	Eau brute	**3,5**	< 5	**10**	< 5	**123**	**17**	**153,5**	**3,5**	**150**	97,7%
15-nov.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°4 (D)	Eau brute	< 4	< 5	**13**	< 5	**110**	**19**	**142**	<	**142**	100,0%
25-oct.-21	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°5	Eau brute	**3,7**	**5,1**	**19**	24	**130**	**67**	**248,8**	**8,8**	**240**	96,5%
5-juil.-22	ANGOMONT	Source d'Allencombe n°5	Eau brute	**4,1**	< 5	**25**	26	**120**	**63**	**238,1**	**4,1**	**234**	98,3%
25-oct.-21	BREMENIL	Réservoir	**Eau distribuée**	< 2	< 5	**3,3**	< 5	**57**	**7,7**	**68**	<	**68**	100,0%
5-juil.-22				< 2	< 5	**6,4**	< 5	**72**	**11**	**89,4**	<	**89,4**	100,0%
15-nov.-21				< 4	< 5	**6,4**	< 5	**79**	**11**	**96,4**	<	**96,4**	100,0%

<	Inférieur à la limite de quantification (LQ)
x	Détecté, quantifié <10 ng/L
xx	Détecté, quantifié ≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xxx	Détecté, quantifié ≥ 100 ng/L

Etude sectorielle du secteur du Lingekopf (département du Haut-Rhin)

Résultats analytiques (octobre 2017). Chlorate, perchlorate, nitrate et ammonium (laboratoire BRGM)

Identifiant - Date d'échantillonnage	Indice national	Désignation	Commune	pH	T°C	conductivité électrique	redox	O_2	ClO_3^- (ion chlorate)	ClO_4^- (ion perchlorate)	NH_4^+ (ammonium exprimé en NH4)	NO_3^- (Nitrates exprimés en NO3)
Limite de quantification (LQ)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,5	0,05	0,5
Unité	-	-	-	-	°C	µS/cm	mV	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l
L23 -25/10/17	03418X0111	BARENSTALL II	HOHROD	6,88	10,3	252	230,6	9,29	<LQ	**2,9**	<LQ	3,1
L40-25/10/17	03418X0062	OBERGUNSBACH AVAL S2	HOHROD	7,15	10,2	182,4	285	10,57	<LQ	**17,9**	<LQ	2,1
L13-25/10/17	03418X0047	LE RAIN DES CHENES SOURCES CATHERINE BASSE	ORBEY	6,08	9,2	33,6	368,9	10,15	<LQ	**3,2**	<LQ	1,4
L14-25/10-17	03418X0052	OTTERLOCH	SOULTZEREN	7,06	9,8	100,8	235	9,38	<LQ	**1,9**	<LQ	3,9
L22-25/10/17	03418X10107	FERME AUBERGE GLASBORN	SOULTZEREN	5,15	10,5	93,8	247	9,54	<LQ	**0,5**	<LQ	6,2
L12-25/10/17	03418X0046	LE RAIN DES CHENES	ORBEY	7,01	8,6	34,3	210	9,35	<LQ	<LQ	<LQ	1
L29-25/10/17	-	SOURCE AMELIE	ORBEY	7,65	9,1	75,4	265	9,9	<LQ	<LQ	<LQ	1,7
L30-25/10/17	-	SOURCE LAURENCE	ORBEY	6,11	10,6	53,5	290	9,95	<LQ	<LQ	<LQ	1,4
L32-25/10/17	-	SOURCE CATHERINE	ORBEY	5,91	8,3	27,2	410	10,96	<LQ	**3,1**	<LQ	1,4
L35-25/10/17	-	SOURCE ELODIE	ORBEY	-	-	-	-	-	<LQ	<LQ	<LQ	2,2

Résultats analytiques (juin 2018). Chlorate, perchlorate, anions, cations et éléments traces (laboratoire BRGM)

			18-21/06/2018							
Elément, composé	Limite de quatification (LQ)	Unité	Source L23	Source L30	Source L32	Source L35	Source L40	Source L41	Source L42	Source L60
pH	-	-	6,77	6,09	5,39	6,25	6,1	6,74	6,64	5,64
T°C	-	°C	9,1	10,8	8,4	8,8	8,8	9,8	9,6	7,9
conductivité électrique	-	µS/cm	100,6	51,1	28,6	69,4	76,9	66	105,5	53
redox	-	mV	187,6	5,2	230,6	194,2	212,7	205,6	193,4	229,9
O2 dissous	-	%	94,6	100,3	101,8		85,8	100,9	95,5	101,8
O2 dissous	-	mgO2/L	10,15	9,68	11,08	8,7	8,94	10,54	9,87	11,03
ClO3- (chlorate)	5	µg/L	< LQ	**8**	< LQ	**5**	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
ClO4- (perchlorate)	0,5	µg/L	**4,6**	< LQ	**0,6**	**2,3**	**4,2**	< LQ	**3,9**	**2,5**
Al (aluminium)	0,5	µg/L	0,58	21,4	23,6	9,07	9,17	6,5	9,75	5,18
As (arsenic)	0,05	µg/L	2,27	1	0,29	3,03	2,86	2,88	14,1	0,18
Cd (cadmium)	0,01	µg/L	< LQ	0,01	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,02
Cr (chrome)	0,1	µg/L	0,87	0,13	0,21	1,03	0,65	0,39	1,06	0,27
Hg (mercure)	15	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Pb (plomb)	0,05	µg/L	< LQ	0,07	< LQ	0,06	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Se (Sélénium)	0,1	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Zn (zinc)	0,5	µg/L	0,76	6,07	2,09	2,01	1,09	< LQ	1,31	2,66
B (bore)	0,5	µg/L	4,02	2,83	2,68	3,16	3,3	3,49	3,51	3,5
Br- (brome)	10	µg/L	< LQ	13	< LQ	14,5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca2+ (calcium)	0,5	mg/L	8,4	3,3	1,5	6	5,6	5,3	9,6	2,3
CO3- (carbonate)	10	mg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
HCO3- (hydrogénocarbonate)	10	mg/L	40	10	< LQ	24	33	26	47	15
Cl- (chlorure)	0,5	mg/L	4,3	5,5	3	4	4,7	3,6	4,1	3,4
I- (iodure)	1	µg/L	1,25	1,13	1,43	1,79	1,33	1,38	1,4	1,53
K+ (potassium)	0,5	mg/L	1,6	3,1	1,3	3,2	2,4	2,2	2,6	1,5
Li+ (lithium)	0,1	µg/L	9,23	0,75	0,47	5,57	2,05	1,33	4,61	0,49
Mg2+ (magnésium)	0,5	mg/L	3,6	0,5	< LQ	1,6	2,2	1,5	4,6	0,6
NO3- (nitrate)	0,5	mg/L	2,4	0,6	1,3	2,7	0,9	0,7	2,9	3,2
Na+ (sodium)	0,5	mg/L	4,6	2,7	1,6	2,8	3,9	3,3	2,5	1,9
SO42- (sulfate)	0,5	mg/L	8,1	2,7	2,4	4,8	5,9	5,2	12,1	5,1

Résultats analytiques sur les eaux souterraines. Etude sectorielle du front de Champagne (camp de Suippes) (départements de la Marne).

Composés inorganiques (laboratoire BRGM)

Libellé	Localisation	Date de prélèvement	Nature de l'échantillon	ClO_3^-	ClO_4^-	NO_3^-	NH_4^+	Cl^-	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	PO_4^-	HCO_3^-	Laboratoire / source
				µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
DOR	Lavoir, Rivière La Dormoise à Rouvroy - Ripont	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	**20,1**	3,4	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
DOR2		?	Eaux superficielles	< 10	**29**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
DOR2		?	Eaux superficielles	< 10	**28,1**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
DOR2		13/06/2017	Eaux superficielles	<50	**33,4**	3,4	<0,05	3,9	0,6	0,8	2,3	-	5,4	<0,05	214	BRGM
DOR2		20/07/2018	Eaux superficielles	**8**	**22,1**	3,1	<0,05	4	<0,5	0,8	2	73,7	-	-	-	BRGM
DOR		22/06/2023	Eaux superficielles	**191**	**14,9**	2,9	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
DOR		10/07/2023	Eaux superficielles	**8**	**22,9**	2,9	-	3,9	-	-	-	-	6,3	-	-	BRGM
DOR Bas		10/07/2023	Eaux superficielles	**8**	**22,1**	2,9	-	3,8	-	-	-	-	6,3	-	-	BRGM
MAR	Rivière du Marson, Pont-de-Marson	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	**19,8**	3,1	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
MARSON		13/06/2017	Eaux superficielles	<50	**30,8**	2,9	<0,05	4,1	0,9	0,9	2,3	-	5,9	<0,05	235	BRGM
MARSON2		20/07/2018	Eaux superficielles	**8**	**18,6**	3,2	<0,05	4,6	0,7	0,8	2	82,7	-	-	-	BRGM
MARSON		22/06/2023	Eaux superficielles	**294**	**14,1**	2,3	<0,05	-		-	-	-	-	-	-	BRGM
MARSON2		?	Eaux superficielles	< 10	**27,2**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
MARSON2		?	Eaux superficielles	< 10	**26,9**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
ETANG	Ruisseau de l'étang de Massiges	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	<0,5	2,5	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
La Suippes (SUIPPES)	La rivière Suippes au pont de Somme-Suippes	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	<0,5	**48,9**	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
SCE-Py	Source de la Py à Somme Py Tahure	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	<0,5	**31,1**	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
RUI	Ruisseau du Vivier à Manre	20/09/2016	Eaux superficielles	<100	**5,0**	8,1	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
Souain Perthes-les-Hurlus	Souain Perthes-les-Hurlus	08/03/2021	Eaux souterraines brutes	-	**7,7**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
		08/03/2021	Eaux traitées / distribuées	-	**7,7**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
		21/06/2022	Eaux souterraines brutes	-	**6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
		21/06/2022	Eaux traitées / distribuées	-	**6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
PERTHES		22/06/2023	Eaux traitées / distribuées	<50	**6,1**	10,6	<0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
PERTHES brute		11/07/2023	Eaux souterraines brutes	**5**	**7,77**	9,5	-	6,4	-	-	-	-	7,4	-	-	BRGM
PERTHES trait		11/07/2023	Eaux traitées / distribuées	**81**	**7,82**	8,9	-	6,7	-	-	-	-	6,9	-	-	BRGM
Dontrien	Dontrien	08/03/2021	Eaux souterraines brutes	-	**13**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ANSES LHN
DONT		22/06/2023	Eaux souterraines traitées	**148**	**8,86**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	BRGM
DONT brute		12/07/2023	Eaux souterraines brutes	**13**	**13,4**	43,5	-	29,6	-	-	-	-	15,5	-	-	BRGM
DONT trait		12/07/2023	Eaux souterraines traitées	**122**	**14,4**	43,8	-	30,2	-	-	-	-	16	-	-	BRGM

Composés nitroaromatiques (points avec au moins une quantification) (laboratoire LHN, ANSES)

Date du prélèvement	Commune	Nature de l'échantillon	Unité	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques	%DNT /nitroaromatiques	%2,6-DNT /DNT
				2-NT	4-NT	2,3-DNT	2,4-DNT	2,6-DNT	3,4-DNT	ΣADNT	ΣDNT	ΣNAC		
08/03/2021	Souain Perthes-les-Hurlus	Eaux souterraines	ng/L	3,9	< 5	**16**	9,4	**60**	**14**	< 10	**99,4**	**103,3**	96,2%	60,4%
08/03/2021		Eaux distribuées	ng/L	4,8	< 5	**18**	**10**	**62**	**16**	< 10	**106**	**110,8**	95,7%	58,5%
21/06/2022		Eaux souterraines	ng/L	3,6	< 5	**14**	8,4	**47**	**11**	< 10	**80,4**	**84**	95,7%	58,5%
21/06/2022		Eaux distribuées	ng/L	3,4	< 5	**13**	7,7	**46**	9,4	< 10	**76,1**	**79,5**	95,7%	60,4%
22/11/2022		Eaux souterraines	ng/L	4	< 5	**19**	7	**76**	**12**	< 10	**114**	**118**	96,6%	66,7%
22/11/2022		Eaux distribuées	ng/L	4,3	< 5	**18**	7,1	**51**	**12**	< 10	**88,1**	**92,4**	95,3%	57,9%
08/03/2021	Dontrien	Eaux souterraines	ng/L	< 2	< 5	< 2	**26**	2,3	< 5	n.m	**28,3**	**28,3**	100,0%	8,1%
08/03/2021		Eaux distribuées	ng/L	< 2	< 5	< 2	**26**	2,3	< 5	< 10	**28,3**	**28,3**	100,0%	8,1%
22/06/2023		Eaux souterraines	ng/L	< 2	**15**	5,3	**41**	**32**	< 5	< 10	**78,3**	**93,3**	83,9%	40,9%
22/06/2023	Rivière Dormoise à Ripont (point DOR)	Eaux superficielles	ng/L	< 2	<5	< 2	**35**	**11**	< 5	**14**	**46**	**60**	76,7%	23,9%
22/06/2023	Rivière Marson à Pont-de-Marson (point MARSON)	Eaux superficielles	ng/L	< 2	<5	**4,3**	**35**	**38**	< 5	< 10	**77,3**	**77,3**	100,0%	49,2%
21/06/2022	Suippes (EDCH, ANSES)	Eaux souterraines	ng/L	< 2	< 5	< 2	<20	<1	< 5	< 10	<	<	-	-
21/06/2022	Sommepy Tahure (EDCH, ANSES)	Eaux souterraines	ng/L	< 2	< 5	< 2	<20	<1	< 5	< 10	<	<	-	-

Résultats analytiques sur les eaux souterraines. Etude approfondie des eaux des puits AEP et des EDCH de Neufchâtel-sur-Aisne (départements de l'Aisne) et de Cramont (département de la Somme). Composés nitroaromatiques (points avec au moins une quantification). Laboratoire d'Hydrologie de Nancy (LHN) de l'ANSES

Captage de Neufchâtel-sur-Aisne. Composés nitroaromatiques (points avec au moins une quantification) (laboratoire LHN, ANSES)

Date du prélèvement	Nature de l'échantillon	Unité	2-Nitrotoluène	4-Nitrotoluène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques	%∑DNT /∑NA	%2,6-DNT /∑DNT
			2-NT	4-NT	2,3-DNT	2,4-DNT	2,6-DNT	3,4-DNT	∑DNT	∑NA		
15/03/2021	Eaux souterraines	ng/L	15	9,7	130	14	310	150	604	628,7	96,1%	51,3%
	Eaux distribuées	ng/L	23	15	180	19	400	220	819	857	95,6%	48,8%

<	Inférieur à la limite de quantification (LQ)
x	Détecté, quantifié <10 ng/L
xx	Détecté, quantifié ≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xxx	Détecté, quantifié ≥ 100 ng/L

Captage de Cramont. Composés nitroaromatiques (points avec au moins une quantification) (laboratoire LHN, ANSES)

Date du prélèvement	Nature de l'échantillon	Unité	1,2-dinitrobenzène	2,3-Dinitrotoluène	2,4-Dinitrotoluène	2,6-Dinitrotoluène	3,4-Dinitrotoluène	Somme 2-Amino-4,6-Dinitrotoluène + 4-Amino-2,6-Dinitrotoluène	Somme des DNT	Somme des nitroaromatiques	%∑DNT /∑nitroaromatiques	%2,6-DNT /DNT
12/02/2023	Eaux souterraines	ng/L	35	13	16	25	17	82	71	188	37,8%	35,2%
31/05/2021	Eaux souterraines	ng/L	22	5,8	5,1	11	9,1	53	31	106	29,2%	35,5%
31/05/2021	Eaux distribuées	ng/L	23	5,8	5,2	12	8,9	50	32	105	30,4%	37,6%

<	Inférieur à la limite de quantification (LQ)
x	Détecté, quantifié <10 ng/L
xx	Détecté, quantifié ≥ 10 ng/L < 100 ng/L
xxx	Détecté, quantifié ≥ 100 ng/L

ANNEXE J
Résultats analytiques des abondances en isotopes stables O, Cl de ClO_4^- (Université du Delaware, USA) et de N, O de NO_3^- (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble) des eaux souterraines et de surface

Isotopes stables de l’oxygène et du chlore des ions perchlorate

Catégorie, nature des échantillons	Dénomination , localisation	$d^{18}O$	$D^{17}O$	$d^{37}Cl$	Gamme des concentrations en ClO4
		‰	‰	‰	µgClO4/L
Explosifs 14 - 18	T58 explosif français	-19,3	0	1	-
	HG3 explosif allemand	-17,2	0,2	1,5	-
	Perdite 1 explosif allemand	-14,4	0,2	1,5	-
	Perdite 2 explosif allemand	-15,4	0,2	0,2	-
Electrosynthèse actuelle	ClO4 liqueur synthèse. Site anonyme	-16,2	0,6	-	-
	ClO3 liqueur synthèse. Site anonyme	-27,9	0,3	-	-
	NaClO4.H2O sels. Site anonyme	-15,9	0,5	-	-
Sels industriels historiques	Site industriel (sols) 1. Anonyme	-18,9	-0,1	0,3	-
	Site industriel (sols) 2. Anonyme	-19	-0,2	0,93	-
Eaux souterraines	Neufchâtel-sur-Aisne (EDCH, brute)	-16,3	2,8	-5,6	[17 - 23]
	Perthes (EDCH, brute)	-18,1	0,2	-0,3	[6 - 8]
	Dontrien (EDCH traitées)	-22,3	0,5	-0,7	[8 - 15]
	Cramont (EDCH, brute)	-26,6	-0,2	1,6	[10 - 15]
	FP5 (source, Argonne)	-28,2	0,01	2,44	[20 - 120]
	Hohrod (EDCH, brute) Obergunsbach S2	-27,5	-0,1	2	[15 - 20]
	Allencombe n°4 (EDCH, brute)	-24,8	-0,1	0,8	[20 - 25]
	Reims - 2019 ESO4	-20,7	0,2	-	[10 - 37]
	Reims - 2019 ESO5	-21,8	0,2	-	
	Reims - 2019 ESO1	-18,2	0,1	-0,2	
	Reims - 2019 ESO2	-29,6	-0,3	-3,3	
	Reims - 2019 ESO3	-30,4	0,5	-4	
	Mainvilliers (EDCH)	-7,3	7,6	-14,1	[20 - 30]
Eaux de surface	Reims - 2019 rivière Py	-22,9	1,3	-6	
	Rivière Dormoise	-24,6	-0,3	0,7	[15 - 35]
Eaux souterraines. Pollution industrielle concentrée historique	Site industriel (ESO) 1. Anonyme	-15,5	0,02	0,8	[5 - 2 500]
	Site industriel (ESO) 2. Anonyme	-21,7	-0,06	0,69	
	Site industriel (ESO) 3. Anonyme	-15,6	-0,02	0,57	
	Site industriel (ESO) 4. Anonyme	-19,7	0,05	0,14	
	Site industriel (ESO) 5. Anonyme	-18,5	0,07	0,37	
Eaux souterraines et de surface. Pollution historique diffuse	Pollution diffuse 1., source. Anonyme	-12,9	0,7	0,3	<5
	Pollution diffuse 2. ESO. Anonyme	-12,9	0,1	0,1	
	Pollution diffuse 3. Rivière. Anonyme	-12	0,2	1	
	Pollution diffuse 4, puits AEP. Anonyme	-17,2	0,3	4,7	
	Pollution diffuse 5, source. Anonyme	-9,6	6,7	-10,7	

Isotopes stables de l’oxygène et de l’azote des ions nitrate

Analyses isotopiques N,O,Cl sur les eaux de l'Argonne et Vauquois

Echantillon / libellé	Secteur	Point de prélèvement	Date de prélèvement	ClO_4^-			NO_3^-							
				$d^{18}O$	$D^{17}O$	$d^{37}Cl$	$d^{17}O$	$d^{18}O$	$D^{17}O$	$d^{15}N$	$d^{17}Oerr$	$d^{18}Oerr$	$D^{17}Oerr$	$d^{15}Nerr$
S'	Vauquois	Galerie française	04/02/2020	-	-	-	3,99	6,04	0,85	11,43	0,83	1,16	0,35	0,12
S' gauche	Vauquois	Galerie française	04/02/2020	-	-	-	-0,54	-1,64	0,31	4,35	1,10	1,77	0,37	0,54
VAUQ 2	Vauquois	Source Fontaine Notre Dame (VAUQ2)	11/02/2019	-	-	-	0,62	0,75	0,23	7,23	1,10	1,77	0,37	0,54
VAUQ1	Vauquois	Source, nord-est	23/06/2023	-	-	-	-0,96	-2,26	0,21	1,51	1,37	2,38	0,38	0,96
RADE (Galerie)	Vauquois	Galerie allemande Raderstollen	01/07/2019	-	-	-	-1,49	-3,51	0,33	7,29	1,37	2,38	0,38	0,96
ALLIEUX	Vauquois	Source Ferme des Allieux	13/02/2019	-	-	-	1,87	3,41	0,10	9,39	1,37	2,38	0,38	0,96
Galerie G	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie allemande	11/06/2019	-	-	-	1,42	2,68	0,02	2,25	0,83	1,16	0,35	0,12
Galerie TEDDY	Argonne, Fille Morte	Galerie allemande	11/06/2019	-	-	-	4,97	6,82	1,42	-0,10	1,10	1,77	0,37	0,54
A3	Argonne, Haute Chevauchée	Galerie allemande	15/10/2021	-	-	-	4,75	6,94	1,14	-0,03	1,10	1,77	0,37	0,54
FP5	Argonne	Four de Paris	13/02/2019	-28.2	0.01	2.44	3,11	4,58	0,72	1,14	1,10	1,77	0,37	0,54

Daniel HUBÉ

(1914-1918)
Première Guerre mondiale sur le front occidental
L'héritage environnemental d'une guerre
et d'une sortie de guerre industrielles

La Première Guerre mondiale (1914-1918) sur le front occidental fut la Grande Guerre de l'Artillerie. Jamais encore auparavant cette arme n'avait été aussi puissante, précise, avec des portées et d'une diversité de moyens qui ne cessèrent de croître durant le conflit. Son usage à des échelles inédites entraîna l'apparition de problématiques restées jusque-là en marge des guerres. 25% du milliard de tirs furent défectueux, constellant le champ de bataille de munitions non éclatées, se mêlant dans la confusion des combats, aux matériels abandonnés. Ces Restes Explosifs de Guerre (REG), toujours en puissance d'explosion, constituèrent un réel danger pour les populations civiles et une entrave à la reprise des activités agricoles. Dès octobre 1914, des instructions furent transmises aux armées pour récupérer ces REG et, si nécessaire, les neutraliser par pétardement (*Open Detonation* (OD)). Ces opérations inscrites dans la dynamique de la guerre restèrent partielles et superficielles. Lorsque survint la retraite allemande, dès la fin de l'été 1918, des quantités considérables de REG s'amoncelèrent, tandis que les surplus de guerre enflèrent à l'arrière dans les dépôts chez les Alliés à hauteur de plusieurs centaines de milliers de tonnes. A la cessation des hostilités, il fallut liquider ces monceaux de munitions, prérequis incontournable et impérieux aux reconstructions industrielles, agricoles, domestiques. Ces démolitions furent opérées en trois temps : (i) en 1918 et 1919 par les militaires, (ii) entre 1920 et 1929 par des entreprises privées avec deux types de contrats, et (iiii) à compter de 1930 sous le même format mais avec un contrat unique. Les REG récupérés étaient cédés aux entreprises moyennant le versement à l'Etat d'une redevance. Les destructions opérées par OD, laissèrent place à compter de 1920 à des procédés de déchargement spécialement adaptés à chaque type d'engins (dont le brûlage*, Open Burning* (OB)) dans le but d'optimiser la récupération des matières valorisables des munitions à des fins profitables. Des installations de démantèlement des REG furent créées *ex nihilo* à cet effet. Ce désobusage industriel fut émaillé d'accidents, de pollutions, de plaintes et s'acheva en France vers 1941. Il fut aussi mené en Allemagne sous le contrôle des Alliés dans le cadre de la démilitarisation exigée par le Traité de Versailles. Ces entreprises périclitèrent avec l'amenuisement des tonnages récupérables et la crise économique mondiale dans l'entre-deux-guerres. Entre 2 et 3 millions de tonnes furent ainsi éliminées générant des pollutions toujours actuelles parfois sévères, spectaculaires (par l'action phytotoxiques des métaux), rares et locales, là où des munitions chimiques, notamment ex-allemandes furent brûlées. Ces pollutions polymétalliques (As, Zn, Cu, Pb, Hg, etc.) sont aussi marquées par des teneurs extrêmes en dioxines et furanes. Les cortèges de polluants de ces résidus de brûlage, peu ou pas mobiles, reflètent la typologie des engins brûlés et les pratiques d'OB.

Les eaux souterraines du quart nord-est de la France sont aussi marquées, à une échelle régionale, par les constituants les plus mobiles des poudres et explosifs et non par celles et ceux utilisés aux plus forts tonnages (TNT, trinitrophénol, etc.): les ions perchlorate (ClO_4^-) synthétiques (distincts des ions naturels d'origine agricole ancienne par leurs signatures isotopiques $\delta^{18}O$ / $D^{17}O$), les isomères du dinitrotoluène (en particulier le 2,6-DNT) et du dinitrobenzène (DNB). DNT et DNB sont typiquement allemands. Les pollutions concentrées se mesurent là où de forts tonnages de matériels explosibles furent (i) détruits par OD et/ou (ii) utilisés et/ou abandonnés (secteurs de guerre de mines), celles, diffuses, s'observent ailleurs sur le front et seraient liées aux résidus d'explosifs (d'engins déflagrés) dispersés dans les sols et aux munitions endommagées éparses en cours de corrosion avancée.

Cette recherche originale, menée aux interfaces poreuses entre histoire environnementale et militaire et les géosciences, apporte la démonstration que la brutalisation environnementale qui accompagne les guerres modernes, moments paroxystiques courts mais d'une extrême violence, marque durablement les sols et les eaux. L'empreinte de la guerre et de sa sortie de guerre industrielle persistera sur des échelles de temps sans commune mesure avec celle des évènements l'ayant généré

Mots clés : munitions, explosifs, déchargement, pollution, pyrotechnique, perchlorate, nitroaromatique

Daniel HUBÉ

(1914-1918)

World War I on the Western Front
The environmental legacy of an industrial war and post-war period

The First World War (1914-1918) on the Western Front was the Great War of the Artillery. Never before had this weapon been so powerful, so precise, with ranges and a diversity of means that continued to grow throughout the conflict. Its use on unprecedented scales led to the emergence of problems that had hitherto remained on the margins of warfare. 25% of the billion projectiles fired were defective, littering the battlefield with unexploded ordnance and mingling with abandoned equipment in the confusion of battle. These Explosive Remnants of War (ERW), still potentially explosive, posed a real danger to civilians and hampered the resumption of agricultural activities. As early as October 1914, instructions were issued to the armed forces to recover these ERW and, if necessary, neutralize them by Open Detonation (OD). These operations were part of the dynamics of the war, but remained during WWI, partial and superficial. By the time of the German retreat in late summer 1918, considerable quantities of ERW had accumulated, while war surplus swelled to several hundred thousand tonnes in Allied depots. Once hostilities had ceased, these heaps of ammunition had to be cleared away, an essential prerequisite for industrial, agricultural and domestic reconstruction. These demolitions were carried out in three stages: (i) in 1918 and 1919 by the military, (ii) between 1920 and 1929 by private companies under two types of contract, and (iiii) from 1930 onwards, under the same format but with a single contract. Salvaged ERW was sold to companies on payment of a fee to the State. From 1920 onwards, destruction by OD gave way to unloading methods (including Open Burning (OB)) specially adapted to each type of munition, with the aim of optimizing the recovery of their valuable components for profitable purposes. ERW breaking-down facilities were created *ex nihilo* for this purpose. The industrial scale ammunition breaking-down was fraught with accidents, pollution and complaints, and was completed in France around 1941. It was also carried out in Germany under Allied control, as part of the demilitarization required by the Treaty of Versailles. As recoverable tonnages dwindled and the global economic crisis worsened in the interwar period, the majority of these companies went into decline. Between 2 and 3 million tonnes were disposed of in this way, generating soil pollution that shines nowodays sometimes severe, spectacular (due to the phytotoxic action of the metals), rare and local, where chemical munitions, particularly ex-German ones, were open-burned. This polymetallic pollution (As, Zn, Cu, Pb, Hg, etc.) is also marked by extreme levels of chlorinated dioxins and furans. The pollutants associations measured in these OB residues, reflects the type of ammunition burned and the OB practices employed. These pollutants are not very mobile and have no impact on groundwater.

Groundwater in the northeast quarter of France is also marked, on a regional scale, by the most mobile constituents of WWI powders and explosives, and not by those used in the highest tonnages (TNT, trinitrophenol, etc.): synthetic perchlorate ions (ClO_4^-) (distinguished from natural ions of ancient agricultural origin by their isotopic signatures $\delta^{18}O$ / $D^{17}O$), dinitrotoluene (in particular 2,6-DNT) and dinitrobenzene (DNB) isomers. DNT and DNB are typical of German high explosives of WWI.

Point source pollution is found where large tonnages of explosive materials were (i) destroyed by OD and/or (ii) used and/or abandoned (mine warfare sectors). Diffuse pollution is found elsewhere on the frontline and is linked to explosive residues (deflagrated ordnance) dispersed in the soil and to scattered damaged munitions in the process of advanced corrosion.

This original research, conducted at the porous interfaces between environmental and military history and the geosciences, demonstrates that the environmental brutalization that accompanies modern wars - short but extremely violent paroxysmal moments - leaves a lasting mark on soil and water. The imprint of war and the aftermath of industrial warfare will persist on timescales far beyond those of the events that generated it.

Keywords: ammunition, explosives, disposal, pollution, pyrotechnic, perchlorate, nitroaromatic

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327
Université d'Orléans,
1A rue de la Férollerie - 45071 Orléans

Centre de Recherche Universitaire Lorrain d'Histoire (CRULH)
Campus Lettres et Sciences Humaines,
23 Boulevard Albert 1er, 54000 Nancy