

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE

Énergie – Matériaux – Sciences de la Terre et de l'Univers (EMSTU)

Laboratoire GREMI

THÈSE présentée par :

Marion KUBLER-RIEDINGER

soutenue le : 15 décembre 2021

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

Spécialité : Énergétique

**Étude de l'échauffement des contacts
dans un disjoncteur basse tension.
Influence de l'arc électrique sur le collage
des contacts.**

THÈSE dirigée par :

M. BAUCHIRE Jean-Marc
M. HONG Dunpin

Professeur, GREMI, Université d'Orléans
Professeur, GREMI, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Mme ALONSO Corinne
M. TESTÉ Philippe

Professeure, Université de Toulouse 3
Chargé de Recherche (HDR), CNRS

JURY :

Mme ALONSO Corinne
M. BAUCHIRE Jean-Marc
M. CARVOU Erwann
M. HONG Dunpin
M. JOYEUX Patrice
Mme PLANCHE Marie-Pierre

Professeure, Université de Toulouse 3
Professeur, GREMI, Université d'Orléans
Enseignant-Chercheur (HDR), Université de Rennes 1
Professeur, GREMI, Université d'Orléans
Docteur, Hager Electro SAS
Présidente du jury. Professeure, Université de Technologie
Belfort Montbéliard
Chargé de Recherche (HDR), CNRS

Remerciements

Ce travail de thèse est le fruit d'une collaboration entre la société Hager Electro SAS et le laboratoire GREMI (Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés).

Je tiens tout d'abord à remercier l'entreprise Hager Electro SAS qui m'a permis de réaliser cette thèse dans de très bonnes conditions. Je remercie mon responsable direct, M. Patrice JOYEUX, les responsables de l'équipe "Pôles de compétences", M. Denis Deckert et M. Julien Jacquel qui lui a succédé, ainsi que le responsable du département R&D, M. Jean-François Bonnardot.

Je remercie également les nombreuses personnes qui m'ont apporté leur aide tout au long de ces années de thèse au sein de l'entreprise : M. Vincent Boiteux pour ses conseils et son aide cruciale à la conception et à la mise en oeuvre des deux gabarits expérimentaux, M. Gauthier Déplaude pour son partage d'expérience et son accompagnement quant à la mise au point des essais expérimentaux et des diagnostics associés, Mme Michèle Brand pour son expertise sur les matériaux de contact métalliques et M. Benjamin Pidancier pour la réalisation des scripts Python m'ayant servi de référence pour l'analyse et la mise en forme de mes résultats. Je n'oublie pas mes collègues de bureau qui m'ont supportée et épaulée, MM. Gauthier Déplaude, Maxime Veidt, Bastien Dolisy, Patrice Joyeux, Tristan Nosal, Vincent Kennel, Nicolas Britsch et Hien Duc Vu, avec une mention spéciale pour ce dernier qui a été d'un grand secours dans la phase de mise en forme de ce manuscrit, ce qui m'a permis de le rendre dans les temps impartis.

Durant cette thèse, j'ai eu l'occasion de travailler au sein du laboratoire GREMI, avec notamment une période de quelques mois sur place à Orléans. Je remercie la directrice du laboratoire, Mme Anne-Lise Thomann pour m'avoir accueillie. Je remercie également toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide pour mes travaux de thèse et qui m'ont pleinement intégrée dans la vie du laboratoire pour que je m'y sente au mieux.

Je remercie mon encadrant industriel, M. Patrice Joyeux, pour son accompagnement sans faille tout au long de ce travail de thèse. Je suis reconnaissante d'avoir pu bénéficier de son expertise et de son expérience dans l'étude des contacts électriques pour mener à bien mes recherches.

Merci également à mes directeur et co-directeur de thèse, MM. Jean-Marc Bauchire et Dunpin Hong du laboratoire GREMI, pour leur accompagnement et leur soutien,

ainsi que pour le partage de leurs connaissances et compétences qui m’ont été très utiles, notamment dans les domaines de l’énergétique et de la spectroscopie.

J’exprime ma sincère reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps à l’évaluation de mon travail de thèse. Merci à Mme Corinne Alonso du laboratoire LAAS et M. Philippe Testé du laboratoire GeePs pour leur travail de rapporteur. Je remercie Mme Marie-Pierre Planche du laboratoire ICB pour avoir accepté d’être la présidente de mon jury de thèse. Merci également à M. Erwann Carvou d’avoir participé à ma soutenance en tant qu’examinateur. Merci à l’ensemble des membres du jury pour leur présence et leur conseils avisés lors de ma soutenance de thèse.

Et enfin je tiens à remercier mes proches et ma famille qui m’ont soutenue tout au long de cette thèse, mais également durant toutes les étapes du parcours la précédant. Je pense particulièrement à mes parents et à mon mari, sans qui rien de tout cela n’aurait été possible. MERCI de tout mon cœur.

Glossaire

AC : Courant alternatif. Dans ce manuscrit, ce terme sera utilisé pour désigner plus précisément un courant sinusoïdal.

Ag : Matériau argent.

AgC : Matériau composite composé d'une matrice de fibre de graphite (4 % massique pour notre travail) dans un substrat en argent.

Aspérités : Reliefs dus à la rugosité des surfaces de contact.

Bain fondu : Volume de matière en fusion à l'interface entre les deux électrodes du contact électrique, ou à l'interface entre une électrode et l'arc électrique.

Bilame : Deux lames minces et étroites de métaux ayant un coefficient de dilatation différent et soudées entre elles à une extrémité. Lors de la montée en température du bilame, les deux lames s'éloignent l'une de l'autre à leur extrémité libre.

CF : Contact fixe.

CM : Contact mobile.

Collage : Dans ce manuscrit, soudure localisée entre les électrodes du contact de coupure.

Courant limite de fusion (ou de refusion) : Intensité du courant pour laquelle les matériaux de contact fondent.

Cu : Matériau cuivre.

Électrode : Élément conducteur qui compose une des deux parties du contact électrique.

Fermeture brusque : Fermeture rapide du contact présent dans le disjoncteur étudié dans ce travail de thèse. La vitesse de fermeture est indépendante de la vitesse de réarmement du produit par l'utilisateur grâce à un système d'accumulation et de restitution d'énergie via un ressort de compression.

Arc de rebond : Arc électrique qui se produit pendant le rebond du contact de coupure, lors de la fermeture de ce contact sur un défaut électrique.

Rayon de contact équivalent : Également abrégé en « Rayon de contact ».

Lors de la mesure de la surface de contact au microscope, le rayon de contact équivalent correspond au rayon du cercle qui a une surface équivalente à celle mesurée.

Soudure : Jointure d'un contact électrique en une seule masse, causée par un échauffement trop important des surfaces de contact des électrodes.

Liste des symboles courants

a : Rayon de contact réel, en considérant la surface de contact comme circulaire.

F : Force de contact totale s'exerçant entre les deux électrodes.

F_c : Force de contact mécanique, imposée par un ressort.

F_c établie : Force de contact mécanique établie.

$F_{collage}$: Force de collage.

FIC : Force à l'instant de contact.

$F_{répulsion}$: Force électromagnétique de répulsion.

H : Dureté du matériau de contact. Si les matériaux sont différents, dureté du matériau de contact le plus mou.

I : Intensité du courant passant dans le contact électrique.

I_0 : Intensité crête du courant passant dans le contact électrique.

I_1, I_2 et I_3 : Intensités moyennes du courant de l'arc de rebond.

I_f : Courant limite de fusion.

I_{MCB} : Intensité de courant passant dans le produit de protection.

$I_{présumé}$: Courant de court-circuit présumé.

I^2t : Contrainte thermique de l'arc de rebond.

λ : Conductivité thermique du matériau de contact.

L : Constante de Lorenz.

ρ : Résistivité du matériau de contact.

R_{equ} : Rayon de contact équivalent.

$R_{striction}$: Résistance de contact due à la constriction des lignes de courant.

T_0 ou T_{amb} : Température ambiante.

T_f : Température de fusion du contact.

T_m : Température maximale de la surface de contact électrique.

U ou $U_{contact}$: Tension aux bornes du contact électrique.

U_f : Tension de fusion du contact.

U_{res} : Tension imposée par le réseau électrique.

U_{MCB} : Tension aux bornes du produit de protection.

ξ : Coefficient de déformation empirique et correctif (prise en compte de l'incertitude sur la valeur réelle de dureté).

Table des matières

Remerciements	i
Glossaire	ii
Liste des symboles courants	iv
Introduction générale	1
1 Contexte de l'étude et problématique	5
1.1 Contexte de l'étude	6
1.1.1 Le contact électrique	6
1.1.2 Le disjoncteur modulaire basse tension	9
1.1.3 Contact de coupure durant les essais de court-circuit	14
1.2 Échauffement du contact électrique	19
1.2.1 Notions de surfaces de contact apparente, mécanique et réelle . . .	19
1.2.2 Résistance de contact et échauffement	21
1.2.3 Impact de la fréquence du courant sur la résistance de contact . . .	27
1.2.4 Impact de la force de contact sur la résistance de contact	28
1.2.5 Force de répulsion	30
1.3 Problématique de collage	33
1.3.1 Origines du collage	33
1.3.2 Force de collage	36
1.3.3 Approche de l'étude sur la problématique de collage	39
1.4 Conclusion	42
2 État de l'art sur le collage	45
2.1 État de l'art sur le collage statique	46
2.1.1 Solution pour la mesure de température du contact	46
2.1.2 Caractéristiques UI	51
2.1.3 Force de collage statique	62
2.2 État de l'art sur le collage dynamique	63
2.2.1 Influence du courant de l'arc pendant le rebond	64
2.2.2 Influence de la durée du rebond	65
2.2.3 Influence de l'énergie apportée par l'arc de rebond durant le rebond	66
2.2.4 Influence de la force de contact statique	69
2.2.5 Différence entre surface soudée et surface fondue	70
2.2.6 Résistance au collage de l' AgC face à l'arc lors du rebond	73
2.3 Conclusion	75

3	Dispositifs et outils expérimentaux	79
3.1	Étude du collage statique	80
3.1.1	Zone de mise en contact	80
3.1.2	Gabarit expérimental	83
3.1.3	Mesures électriques	85
3.1.4	Mesures mécaniques et thermiques	88
3.1.5	Analyse des surfaces de contact	88
3.2	Étude du collage dynamique	97
3.2.1	Zone de mise en contact	99
3.2.2	Mise en mouvement	101
3.2.3	Montage électrique	104
3.2.4	Diagnostics électrique et mécanique	104
3.2.5	Diagnostic optique de l'arc de rebond	107
3.2.6	Analyse des surfaces de contact	110
3.3	Conclusion	110
4	Étude du collage statique	111
4.1	Échauffement dans un contact statique à surface constante	112
4.1.1	Constriction dans une barre calibrée	112
4.1.2	Constriction dans un contact soudé	116
4.1.3	Simulation de l'essai statique en comportement 2	123
4.2	Échauffement dans un contact statique avec évolution de la surface de contact	130
4.2.1	Approche pour cette étude	131
4.2.2	Comparaison avec la littérature	132
4.2.3	Simulation de l'essai statique en comportement 1	133
4.2.4	Influence de l'intensité crête I_0 sur l'échauffement	142
4.2.5	Influence de la force de contact statique F_c sur l'échauffement . . .	152
4.3	Conclusion	157
5	Étude du collage dynamique	161
5.1	Protocole de test	161
5.1.1	Intensité du courant	162
5.1.2	Nombre d'échantillons et nombre d'essais par échantillon	162
5.2	Caractéristiques UI lors de la fermeture	164
5.2.1	Étapes temporelles sur les caractéristiques UI	164
5.2.2	Critères menant aux comportements électriques 1 ou 2	171
5.2.3	Bosses dans l'évolution de la tension de contact	175
5.3	Simulation de l'essai dynamique grâce au modèle par analogie	177
5.3.1	Définition des paramètres initiaux et modification du script	177
5.3.2	Résultats	179
5.4	Force de collage	188
5.4.1	Types de collage rencontrés dans ces essais	188
5.4.2	Influence de la contrainte thermique de l'arc de rebond sur la force de collage	189
5.5	Aperçu de l'influence des matériaux de contact dans les phénomènes de collage	192
5.5.1	Résultats de l'imagerie rapide et de la spectroscopie	192
5.5.2	Analyse matériaux de la surface des échantillons	195
5.6	Conclusion	197

Conclusion générale	201
Bibliographie	205
Annexes	211

Introduction générale

Le travail présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche) et est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire GREMI (Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés) d'Orléans et la société Hager Electro SAS située à Obernai. Il concerne l'étude de l'échauffement des contacts dans un disjoncteur basse tension, en incluant l'influence de l'arc électrique sur la soudure des contacts.

Dans les installations électriques, le disjoncteur modulaire basse tension a un rôle de protection. En effet, il limite et coupe les courants de surcharge, c'est-à-dire les courants d'intensité supérieure au courant nominal pour lequel il a été conçu. La surcharge peut être lente lorsque le réseau consomme une intensité légèrement supérieure à l'intensité nominale, de l'ordre de 10 % supplémentaire, ou rapide, aussi appelée court-circuit, lorsque l'intensité du courant augmente brusquement pour atteindre des intensités de l'ordre de la centaine d'ampères à plusieurs kiloampères. Lors de ces surcharges, le disjoncteur modulaire réduit les échauffements dus à l'effet Joule qui peuvent être néfastes pour l'installation électrique et pour les équipements qui y sont connectés. De plus, après la coupure du courant, le disjoncteur modulaire garantit l'isolation du circuit présentant le défaut.

Lors de l'apparition d'un courant de surcharge, le disjoncteur détecte le défaut puis il limite et coupe le courant en utilisant les propriétés de l'arc électrique généré dans sa chambre de coupure par l'ouverture du contact. Le contact présent dans la chambre de coupure doit ainsi gérer successivement plusieurs phases qui conditionnent le reste de l'opération de coupure :

- Avant l'ouverture des électrodes, le contact doit supporter le passage d'une intensité de courant plus élevée que son intensité nominale d'utilisation en maîtrisant les échauffements.
- Au début de l'ouverture, lorsque la distance inter-électrodes est faible, l'arc reste immobile et crée des bains de matières fondues sur la surface des deux électrodes. Le contact doit supporter au mieux la température élevée de l'arc en limitant le phénomène d'érosion, en particulier les projections de métaux en fusion ou leurs vaporisations pour garantir la bonne isolation électrique de l'air à l'intérieur de la chambre et ainsi éviter les ré-allumages d'arc.
- Lorsque la distance inter-électrodes est suffisante, le contact doit faciliter le dépla-

cement de l'arc vers le reste de la chambre de coupure. En effet, plus le déplacement est rapide, moins il y aura d'érosion et de projections de matières.

Par ailleurs, lorsqu'un disjoncteur est réarmé, l'électrode mobile effectue un rebond sur l'électrode fixe qui peut amener à la création d'un arc de rebond, puis à un collage du contact qui peut être préjudiciable à son bon fonctionnement futur.

Au vu de l'ensemble des propriétés que doit satisfaire le contact de la chambre de coupure, sa conception et sa mise au point sont cruciales. Compte-tenu de ses propriétés, l'argent est largement utilisé comme matériau de contact de base. En effet, il s'oxyde très peu, et son éventuel oxyde se dégrade facilement avec la température, ce qui permet de garantir une faible résistance de contact. De plus, ses conductivités électrique et thermique élevées limitent son échauffement par effet Joule et assurent une bonne dissipation de la chaleur générée au contact. Néanmoins sa température de fusion relativement faible mène à des problématiques de soudure. En effet si le passage du courant fait augmenter la température de surface des électrodes au-delà de leur température de fusion, les matériaux fondent et se mélangent. Puis lors de la baisse du courant, la température du contact diminue et la matière fondue se solidifie : c'est un « collage potentiel ». Par la suite, lors de la présence d'un nouveau défaut sur la ligne électrique, si la force d'ouverture du contact imposée par le produit n'est pas suffisante, il y aura un collage des contacts, donc un échec de l'ouverture du contact. Le disjoncteur ne pourra alors plus couper le courant, ce qui implique des échauffements considérables, avec la destruction voire l'explosion du produit de protection ainsi que plus généralement des dommages potentiels pour les biens et les personnes. La protection du réseau en aval ne sera plus assurée.

Le phénomène de collage est donc une problématique majeure pour les industriels proposant des produits de protection électriques, et l'étude des échauffements du contact est un vaste sujet qui les soucie depuis plusieurs décennies. Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de ces recherches en proposant une étude centrée sur les deux types de collage pouvant se produire dans le contact du disjoncteur modulaire de la marque Hager. Deux équipements expérimentaux de test ont ainsi été développés et exploités pour caractériser les échauffements de ce contact et les phénomènes de collage associés. Le premier est dédié à l'étude du collage statique où l'échauffement des matériaux est dû à la constriction des lignes de courant au passage du contact. Le deuxième est utilisé pour l'étude du collage dynamique où l'échauffement des matériaux de contact provient principalement de la chaleur générée par un arc électrique à la suite d'un mouvement relatif des électrodes.

Nous entamerons la restitution de ce travail en détaillant le fonctionnement du disjoncteur modulaire basse tension et le rôle crucial du contact présent dans sa chambre de coupure. Nous décrirons ensuite les phénomènes physiques qui augmentent la résistance de ce contact et qui mènent à son échauffement. La problématique de collage qui en

découle sera également détaillée et nous présenterons l'approche retenue pour l'étude de cette problématique.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit synthétisera les nombreux éléments bibliographiques existants sur le thème du collage. Nous nous intéresserons d'abord au phénomène de collage statique en détaillant en premier lieu la solution utilisée expérimentalement pour la mesure de la température de contact, à travers la formule de Kohlrausch. Nous présenterons également la formule théorique définissant la force de collage statique maximale que peut développer un contact, qui est très utile pour le dimensionnement du mécanisme d'ouverture du contact. Les éléments sur le phénomène de collage dynamique seront également synthétisés avec les résultats obtenus dans le cas d'une soudure à la fermeture avec rebond car c'est cette configuration que nous chercherons à reproduire dans ce travail de thèse.

Pour étudier la problématique de collage présentée dans les deux premiers chapitres, nous avons fait le choix d'une expérimentation sur deux gabarits qui seront décrits dans le chapitre 3. Les outils de diagnostics électriques, métallurgiques, mécaniques et optiques y seront également détaillés.

Les chapitres 4 et 5 seront consacrés à la présentation des résultats de nos études sur le collage statique et sur le collage dynamique. Ces résultats seront principalement d'ordre expérimental, et seront complétés par des résultats de simulation numérique. L'objectif du quatrième chapitre sera de caractériser les échauffements menant au collage statique afin de trouver les paramètres limites permettant d'éviter la fusion des matériaux de contact. Notre démarche sera progressive, en analysant d'abord les phénomènes d'échauffement dans un contact statique où la surface de passage du courant est constante, puis dans un contact plus complexe avec une surface de passage du courant qui évolue durant l'essai. Dans le chapitre 5, nous étudierons les conséquences de l'arc électrique de rebond qui se crée lors du rebond à la fermeture du contact. Nous détaillerons l'incidence de cet arc de rebond sur les échauffements du contact une fois celui-ci refermé, et nous quantifierons la soudure causée par l'arc de rebond en analysant la force de collage dynamique associée.

Enfin, nous conclurons ce manuscrit en synthétisant et en faisant un bilan de l'ensemble des résultats obtenus lors de nos études sur les collages statique et dynamique. Nous présenterons également les pistes d'amélioration et les perspectives de recherche mises à jour par ce travail.

Chapitre 1

Contexte de l'étude et problématique

Le réseau électrique français s'articule autour des réseaux de transport et de distribution tels que présentés à la Figure 1.1. Le réseau de transport est utilisé pour acheminer l'énergie produite par les centrales électriques sur de longues distances grâce à des niveaux de tensions élevées, de 63 à 400 kV. Ces tensions en HT et THT assurent, pour une même puissance électrique transportée, une intensité de courant faible et donc des pertes par effet Joules réduites jusqu'à des infrastructures ayant une forte consommation d'énergie, ou jusqu'à des postes de transformation qui font le lien avec un réseau de distribution. Le réseau de distribution est le dernier maillon du réseau avec une structure ramifiée qui permet d'acheminer l'électricité à l'échelle locale jusqu'aux consommateurs finaux, soit en MT (20 kV) pour des consommateurs du secteur tertiaire (commerces, hôtels, etc), soit en BT (230 et 400 V) pour les logements résidentiels.

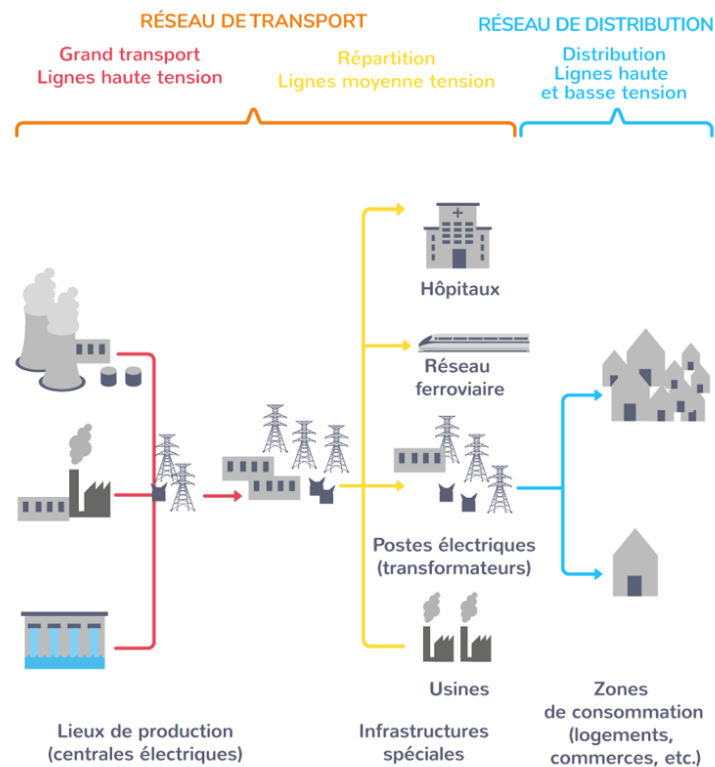


FIGURE 1.1 – Organisation typique du réseau électrique français.[1]

Les puissances délivrées par les transformateurs HT/BT peuvent aller typiquement jusqu'à 1250 kVA et sont capables de délivrer une intensité de plusieurs kA en permanence. C'est dans ce contexte que les produits de protection électriques ont une place indispensable. En effet, les réseaux domestiques présents au sein des habitations sont dimensionnés pour fonctionner à un courant nominal, c'est-à-dire à un courant supporté de manière permanente par tous les éléments du réseau. Or deux catégories de défauts électriques peuvent apparaître dans ces réseaux domestiques et engendrer une augmentation anormale de l'intensité de courant :

- La surcharge lente où le réseau consomme une intensité légèrement supérieure à l'intensité nominale, de l'ordre de 10 % supplémentaire.
- La surcharge rapide, appelée court-circuit, où l'intensité du courant augmente brusquement pour atteindre des intensités de l'ordre de la centaine d'ampères à plusieurs kiloampères.

Lors de l'apparition de ces défauts les produits de protection, et particulièrement le disjoncteur BT en étroite relation avec ce travail de thèse, ont pour rôle d'assurer la sécurité des biens et des personnes. Ils sont pour cela capables de détecter le défaut puis de limiter et de couper le courant de surcharge qui circule dans le réseau.

Le premier chapitre de ce manuscrit sera consacré à l'explication du contexte de l'étude et à la présentation de la problématique de collage des contacts. Après avoir décrit le principe de la coupure du courant dans un disjoncteur modulaire BT, nous détaillerons tout d'abord le fonctionnement et le rôle crucial du contact présent dans la chambre de coupure du disjoncteur. Nous décrirons ensuite d'un point de vue microscopique les phénomènes physiques qui peuvent mener à l'échauffement de ce contact. Nous définirons pour cela la notion de résistance de contact qui est à l'origine de cet échauffement et nous passerons en revue les paramètres physiques ayant un impact sur cette résistance. Nous terminerons ce chapitre en décrivant la problématique de collage qui est le thème principal de ce manuscrit de thèse. Nous détaillerons les causes ainsi que les deux types de collages existants. Nous définirons également la force de collage qui permet de quantifier l'intensité du collage et nous présenterons finalement l'approche retenue dans ce travail de thèse pour l'étude de la problématique de collage.

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 Le contact électrique

Dans son ouvrage monographie [2], Holm définit la notion de contact électrique comme :

« Un contact électrique est une jonction séparable entre deux conducteurs, qui est capable de laisser passer un courant électrique. »

Cette définition est très large. Nous pouvons ainsi trouver des contacts à toutes les échelles de notre réseau électrique où ils sont utilisés pour établir, maintenir et/ou interrompre le courant, et/ou isoler un circuit. Les figures suivantes illustrent la grande variété des contacts existants avec par exemple en Figure 1.2 le contact présent dans chacun des sectionneurs des postes de transformation (lignes à 63 et à 90 kV) du réseau de transport (le premier est encadré sur la photo) ou en Figure 1.3 le contact du système d'ouverture dans un disjoncteur modulaire (230 V, 63 A) de beaucoup plus petites dimensions. L'étude des contacts électriques a donc un fort intérêt puisque les contacts sont des maillons essentiels de la chaîne que constitue le réseau électrique. Le champ applicatif de cette étude est également vaste étant donné la diversité des contacts pouvant être rencontrés à partir des sites de production jusqu'aux installations électriques domestiques.



FIGURE 1.2 – Photographie du contact fermé dans chacun des six sectionneurs d'un poste de transformation (ligne de 90 kV pour les trois les plus en avant et de 63 kV pour les trois du fond). Le premier contact le plus en avant est encadré en rouge [3].

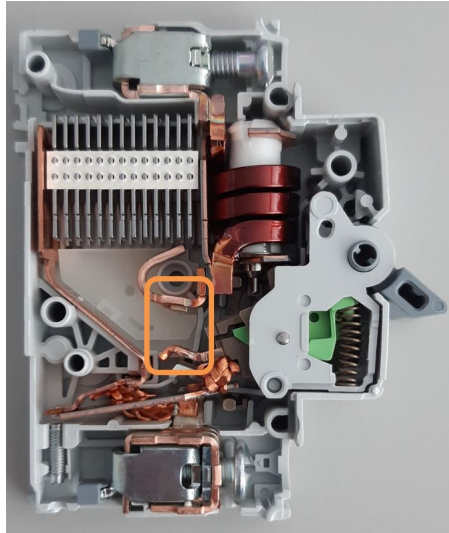


FIGURE 1.3 – Photographie du système d'ouverture dans un disjoncteur modulaire 230 V 63 A. Le contact (en position ouverte) est encadré en orange.

Si nous nous concentrons plus précisément sur les composants de la gamme Hager, nous pouvons classer leurs contacts électriques en quatre grandes familles illustrées dans la Figure 1.4 :

- Les contacts soudés, comme les multiples soudures entre les pièces d'un produit de protection par exemple. Ces contacts, bien qu'a priori faits pour être non séparables, peuvent l'être si la force de séparation est assez élevée. Ils entrent donc dans la définition du contact électrique donnée par Holm ;
- Les contacts de connexion, comme les borniers à vis, les prises murales, les fusibles et porte-fusibles ainsi que les contacts entre les jeux de barres ;
- Les contacts glissants, comme le contact «braidless» présent dans certains types de disjoncteurs Hager ;
- Et les contacts de coupure, comme celui présent dans le système d'ouverture de la chambre de coupure des produits de protection.

Lors d'une opération de coupure, il arrive que les échauffements des électrodes du contact de coupure occasionnent une soudure de ce contact, appelée « collage » dans ce manuscrit. Ce collage est une problématique importante puisqu'il peut empêcher l'ouverture et donc le bon déroulement de l'opération de coupure, et ainsi engendrer des risques pour la sécurité des biens et des personnes. Les travaux de cette thèse porteront sur l'étude de ce contact électrique de coupure.

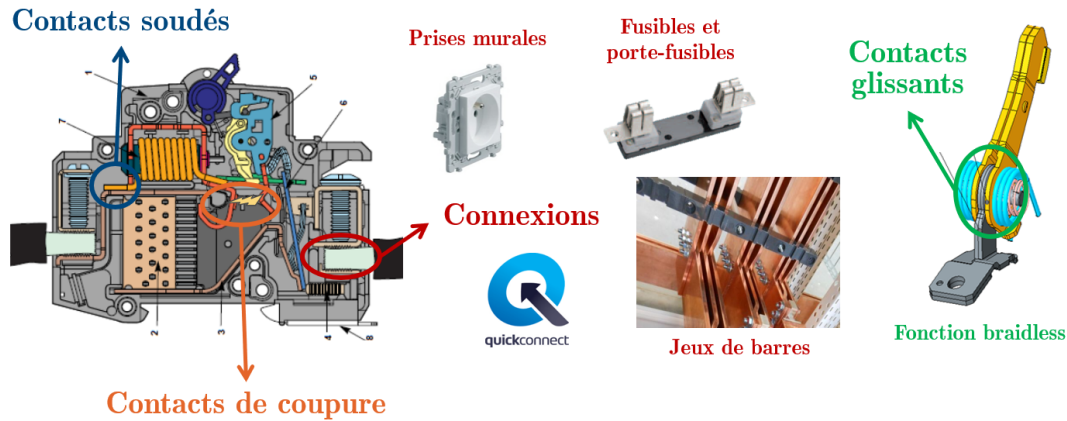


FIGURE 1.4 – Les quatre grandes familles de contacts électriques : Les contacts soudés, de coupure, glissants, et les connexions.

1.1.2 Le disjoncteur modulaire basse tension

Rôle et structure

Le disjoncteur modulaire basse tension (BT) a un rôle de protection. Il coupe en effet les courants d'intensité supérieure au courant nominal (de l'ordre de l'ampère à la dizaine d'ampères) pour lequel il a été conçu, ce qui annule les échauffements dus à l'effet Joule qui peuvent être néfastes pour l'installation électrique et les équipements qui y sont connectés. De plus, après la coupure du courant, le disjoncteur modulaire garantit l'isolation du circuit.

La structure du disjoncteur est constituée de plusieurs sous-ensembles assurant chacun une fonction bien définie. Ces sous-ensembles sont illustrés à la Figure 1.5 :

- Les deux borniers, ici à vis, pour le raccordement électrique au reste du circuit ;
- Les modules thermique et magnétique pour la détection des surcharges électriques ;
- La serrure qui assure l'ouverture et la fermeture mécanique du contact présent dans la chambre de coupure ;
- Et la chambre de coupure qui a pour mission de couper le courant en éteignant l'arc créé par l'ouverture du contact.

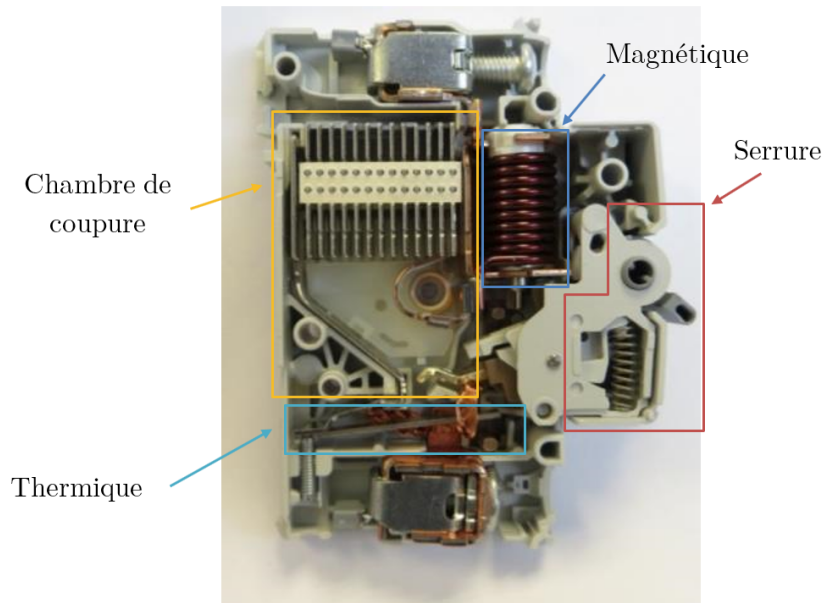


FIGURE 1.5 – Structure typique d'un disjoncteur modulaire une phase.

Pour éviter les échauffements trop importants, le disjoncteur modulaire est capable de détecter deux types de surcharges électriques grâce à ces deux modules de déclenchement. Les surcharges lentes, à partir de 1,13 fois l'intensité nominale du courant du produit sont détectées par le module thermique. Il est constitué d'un bilame, deux lames métalliques soudées entre elles à l'une de leurs extrémités et ayant un coefficient de dilatation différent. Lorsque le courant est légèrement supérieur au courant nominal, l'échauffement par effet Joule entraîne une déformation différente pour chacune des lames à leur extrémité non soudée, ce qui va déclencher le système d'ouverture via la serrure. La réaction aux surcharges lentes est assez longue, entre la seconde et l'heure en fonction de l'intensité du courant de surcharge. Le deuxième type de surcharge est la surcharge rapide (le court-circuit) avec une intensité de courant au minimum trois fois plus élevée que l'intensité nominale. La forte variation d'intensité passant dans la bobine du module magnétique engendre un champ magnétique assez intense pour déplacer le noyau mobile présent à l'intérieur de cette bobine. C'est ce mouvement rapide du noyau qui va déclencher l'ouverture du contact via le mécanisme de la serrure. Ici, comme l'intensité du courant de court-circuit est plus élevée, le déclenchement doit se faire en un temps beaucoup plus court que pour le déclenchement thermique, de l'ordre de la milliseconde.

Principe de la coupure dans un disjoncteur modulaire BT

Pour limiter au maximum l'intensité et la contrainte thermique du courant lors d'une surcharge, nous avons vu dans le paragraphe précédent que les modules thermique ou magnétique du disjoncteur vont déclencher le système mécanique de la serrure pour ouvrir les électrodes présentes dans la zone de contact de la chambre de coupure. La Figure 1.6

illustre le déplacement de l'arc électrique créé dans cette zone de contact jusqu'à un ensemble de plaquettes de fractionnement nommé « déion » dans ce travail. C'est l'apparition de cet arc ainsi que son déplacement qui vont permettre de limiter puis de couper le courant de surcharge.

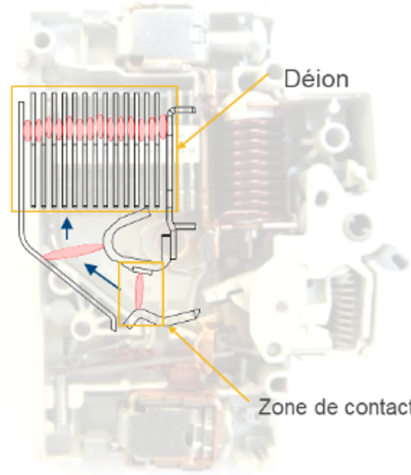


FIGURE 1.6 – Principe de la coupure dans un disjoncteur modulaire BT.

Si nous nous référons au schéma électrique typique de la Figure 1.7 représenté sans défaut électrique, nous pouvons écrire l'équation (1.1) bien connue qui relie l'intensité passant dans le produit aux tensions du réseau U_{res} et du produit U_{MCB} :

$$u_{res}(t) = L_{ligne} \frac{di_{MCB}(t)}{dt} + R_{ligne} \cdot i_{MCB}(t) + u_{MCB}(t) \quad (1.1)$$

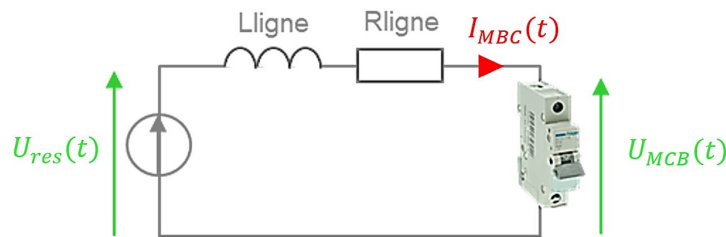


FIGURE 1.7 – Schéma d'un circuit électrique typique sans défaut électrique.

Lors de l'apparition d'un défaut électrique sur la ligne, et plus particulièrement lors d'un court-circuit, la variation de l'intensité du courant $\frac{di_{MCB}}{dt}$ est très élevée, de l'ordre de $10^6 A.s^{-1}$.

Pour arriver à inverser le sens de variation du courant, il faut rendre ce terme dérivée négatif, ce qui se traduit par l'inéquation (1.2) :

$$u_{MCB}(t) + R_{ligne} \cdot i(t) > u_{res}(t) \quad (1.2)$$

Pour garantir cette condition, la tension u_{MCB} aux bornes du disjoncteur doit devenir plus grande que la tension imposée par le réseau électrique, soit environ 230 V :

$$u_{MCB}(t) > u_{res}(t) \quad (1.3)$$

Le disjoncteur utilise la présence de l'arc dans la chambre de coupure pour augmenter sa tension u_{MCB} . En effet dès l'ouverture des électrodes, l'apparition d'un arc électrique ajoute une tension supplémentaire dans le circuit. La Figure 1.8 illustre l'arc électrique entre les électrodes de contact avec en dessous les trois composantes de la tension totale à ses bornes :

- Les tensions cathodique et anodique qui apparaissent dès la moindre séparation des contacts et qui sont fonction des matériaux utilisés [4]. Leur somme est d'environ 12 V pour le couple de matériaux testé durant cette thèse ;
- Et la tension de colonne qui est proportionnelle à la longueur de l'arc, de l'ordre de quelques volts par millimètre.

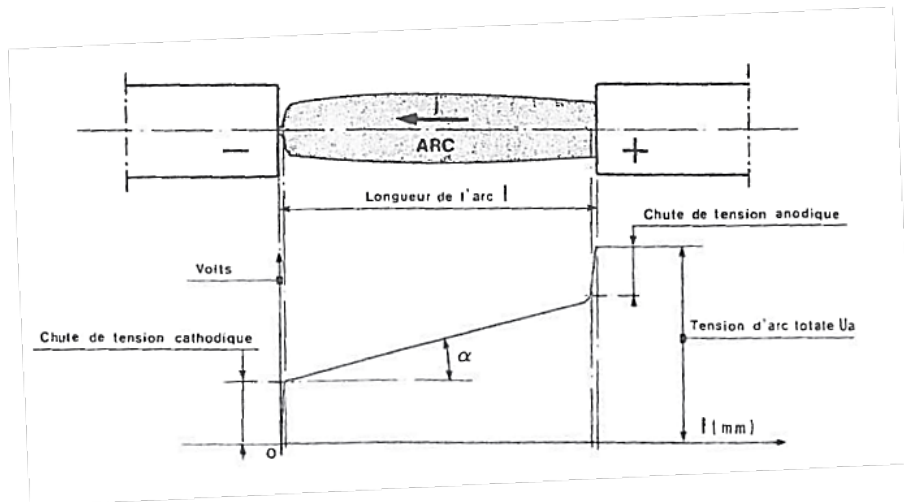


FIGURE 1.8 – Schéma d'un arc électrique entre deux électrodes planes, ainsi que son niveau de tension en fonction de l'éloignement par rapport à la cathode. [5].

Au fur et à mesure de l'ouverture mécanique des électrodes par la serrure du produit, l'arc s'allonge de plus en plus. La force de Laplace qui s'exerce sur l'arc devient ainsi de plus en plus importante [6] et permet le mouvement de l'arc et son allongement à l'intérieur de la chambre de coupure. La tension de l'arc augmente alors progressivement du fait de l'élévation de sa tension de colonne. Cependant ce phénomène ne dépassera pas les 100 V d'augmentation dans le cas d'un produit de protection modulaire, ce qui ne suffira donc pas pour atteindre la condition $u_{MCB}(t) > u_{res}(t)$. Le phénomène physique utilisé pour les produits modulaires est en fait le fractionnement de cet arc dans le déion de la chambre de coupure, comme l'illustre la Figure 1.9. Dès que l'arc entre dans le déion, il est divisé en plusieurs arcs en série grâce aux plaquettes de fractionnement métalliques (14 arcs série dans le disjoncteur étudié pour ce travail). La tension globale due aux colonnes d'arc va diminuer à cause de l'épaisseur des plaquettes du déion, mais la multiplication des tensions cathodiques et anodiques va brutalement augmenter la tension aux bornes

du produit et dépasser la tension réseau. C'est ce principe qui est utilisé pour diminuer le courant traversant le produit jusqu'à le couper grâce à l'extinction des arcs série [7].

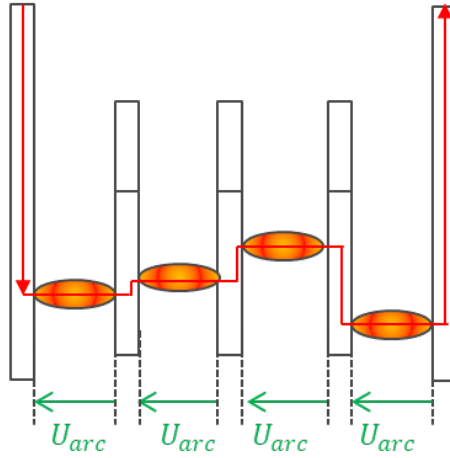


FIGURE 1.9 – Schéma du principe de fractionnement de l'arc dans le déion.

Les courbes temporelles du graphique de la Figure 1.10 synthétisent l'ensemble des étapes de la coupure précédemment expliquées. Nous pouvons y retrouver le courant de court-circuit présumé $i_{présumé}(t)$ qui passerait dans la ligne si le produit de protection était absent, le courant passant dans le produit de protection $i_{MCB}(t)$, la tension réseau $u_{res}(t)$ ainsi que la tension aux bornes du produit de protection $u_{MCB}(t)$. Dans la première phase ($t < t_1$) le courant $i_{MCB}(t)$ dans le produit augmente avec la tension réseau, sur le principe de la loi d'Ohm avec comme impédance celle du produit. À t_1 se produit l'ouverture du contact de la chambre de coupure. Le saut de tension du produit $u_{MCB}(t)$ correspond à l'apparition de l'arc et sa tension associée. Entre t_1 et t_2 l'augmentation de la tension produit est obtenue grâce à l'allongement de l'arc dans la chambre de coupure. À t_2 l'arc entre dans le déion et la tension produit $u_{MCB}(t)$ dépasse la tension réseau $u_{res}(t)$. L'intensité du courant chute alors rapidement jusqu'à l'extinction de l'arc fractionné à l'instant t_3 .

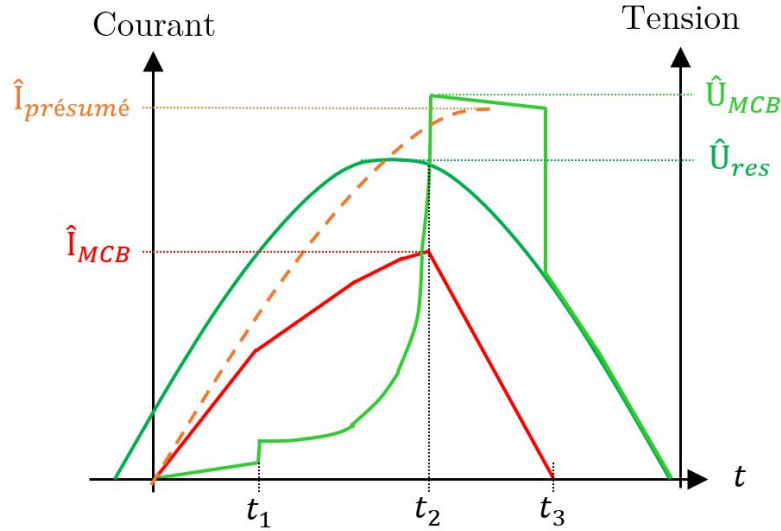


FIGURE 1.10 – Courbes temporelles du courant passant dans le disjoncteur modulaire $i_{MCB}(t)$, de la tension réseau $u_{res}(t)$ et de la tension aux bornes du disjoncteur $u_{MCB}(t)$ pendant une coupure à la suite d'un court-circuit. La courbe du courant présumé $i_{présumé}(t)$ est également représentée pour se faire une idée de son intensité si le produit de protection étant absent. Le temps t_1 correspond à l'ouverture du contact dans la chambre de coupure, le temps t_2 l'entrée de l'arc dans le déion et le temps t_3 l'instant d'extinction de l'arc fractionné.

1.1.3 Contact de coupure durant les essais de court-circuit

Le contact du système d'ouverture des produits de protection est soumis à deux types d'essais de court-circuit :

- Les essais « O » pour « Open ». Le produit de protection est avant le test dans un état passant avec le contact de coupure fermé. Au moment du test, un courant de court-circuit est injecté dans le produit. Le produit détecte le défaut et interrompt ce courant selon le mécanisme de coupure précédemment décrit ;
- Les essais « CO » pour « Close Open ». Le produit est réarmé (i.e. contact fermé, « Close ») sur un défaut de court-circuit déjà existant avant le test. Il détecte le défaut et coupe le courant (« Open »).

Ces deux types d'essais ont des caractéristiques spécifiques. Ils diffèrent notamment par la force de contact avec laquelle sont maintenues les électrodes avant leur ouverture lors de l'opération de coupure. Nous décrirons dans la suite de cette partie l'évolution de cette force de contact pendant les deux types d'essais de court-circuit.

Phénomène de rebond induit par le système de fermeture brusque

Avant de détailler les deux sortes d'essais de court-circuit ainsi que les forces de contact associées, il est important de définir la fonction de fermeture brusque du contact dont sont équipés les disjoncteurs étudiés dans ce travail de thèse. Les conséquences de cette fonction sont en effet importantes dans les essais « CO » où elle est utilisée, notamment à cause du rebond induit par la vitesse de fermeture élevée des contacts.

Le terme de fermeture brusque désigne un mécanisme de fermeture du contact qui se veut indépendant de la vitesse de réarmement du produit par l'utilisateur. Cette vitesse de fermeture a l'avantage d'être stable pour chacun des réarmements et empêche une fermeture des électrodes trop lente en cas d'hésitation de l'utilisateur. En effet une fermeture trop lente est néfaste pour le contact puisqu'il peut y avoir un phénomène de claquage électrique ou encore des échauffements importants à cause d'une force de contact trop faible. Néanmoins cette vitesse de fermeture est élevée ce qui mène dans les produits étudiés à un phénomène de rebond mécanique.

Les étapes du système de fermeture brusque sont d'abord exposées à l'échelle du produit à la Figure 1.11. Au départ sur l'image de gauche, le disjoncteur est en position OFF, c'est-à-dire que le contact est ouvert à la distance inter-électrodes maximale. L'utilisateur commence ensuite à réarmer le produit grâce la manette située à l'avant de celui-ci et l'électrode mobile du bas se rapproche en conséquence du contact du haut qui lui est fixe. Une fois que la manette atteint sa position horizontale (image du milieu), le mécanisme présent dans la serrure bloque le rapprochement des électrodes malgré la suite du réarmement par l'utilisateur. La distance inter-électrodes est appelée « hauteur de lâcher ». Durant cette phase, l'énergie de réarmement est emmagasinée dans un ressort de torsion appelé « ressort de contact ». Lorsque la manette arrive à son point le plus haut (position ON visible sur l'image de droite), c'est le début de la fermeture brusque. L'électrode mobile est relâchée et vient se refermer sur l'électrode fixe avec l'énergie restituée par le ressort de contact.

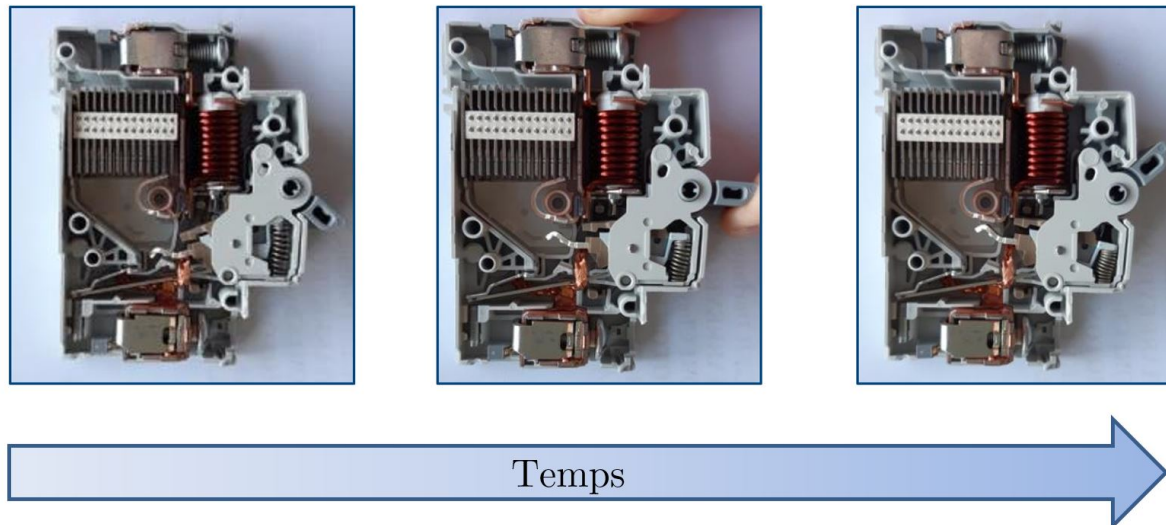


FIGURE 1.11 – Étapes du système de fermeture brusque à l'échelle du produit. À gauche le disjoncteur en position OFF (contact ouvert). Au milieu la position de la manette à partir de laquelle la distance inter-électrodes est bloquée. La suite du réarmement par l'utilisateur crée une énergie emmagasinée par le ressort de contact. Sur l'image de droite la manette a atteint sa position haute, l'électrode mobile est libérée et vient se fermer sur l'électrode fixe grâce à l'énergie restituée par le ressort de contact.

Faisons maintenant un zoom sur la zone de contact pendant la phase de fermeture brusque pour y voir plus en détail ce qu'il s'y passe. La première image de la Figure 1.12 représente les contacts éloignés d'une distance correspondant à la hauteur de lâcher, au moment du déclenchement de la phase de fermeture brusque. L'électrode mobile se

rapproche de l'électrode fixe avec une vitesse élevée dépendant de l'énergie du ressort jusqu'au moment du premier contact (deuxième image) qui dure d'environ 0,1 ms. Dans le cadre des essais « CO » où le défaut électrique est présent sur la ligne avant essai, ce premier contact correspond au début du passage du courant de court-circuit. Si la vitesse de fermeture est trop importante, l'électrode mobile rebondit sur l'électrode fixe. Ce phénomène est appelé « rebond à la fermeture » et il est illustré sur la troisième image de la Figure 1.12, avec une amplitude exagérée pour être visible. Pendant ce rebond purement mécanique de l'ordre de 0.2 ms, l'ouverture des électrodes engendre un arc électrique à cause du courant établi lors du premier contact. Nous appellerons cet arc « arc de rebond » dans la suite de ce manuscrit pour le différencier clairement de l'arc se déplaçant dans la chambre de coupure. La dernière image de la Figure 1.12 représente la position des électrodes à la fin de la fermeture brusque, lorsque le produit est en position ON. Le produit met ensuite environ 1 ms pour détecter le défaut de court-circuit grâce au module magnétique et pour ouvrir le contact.

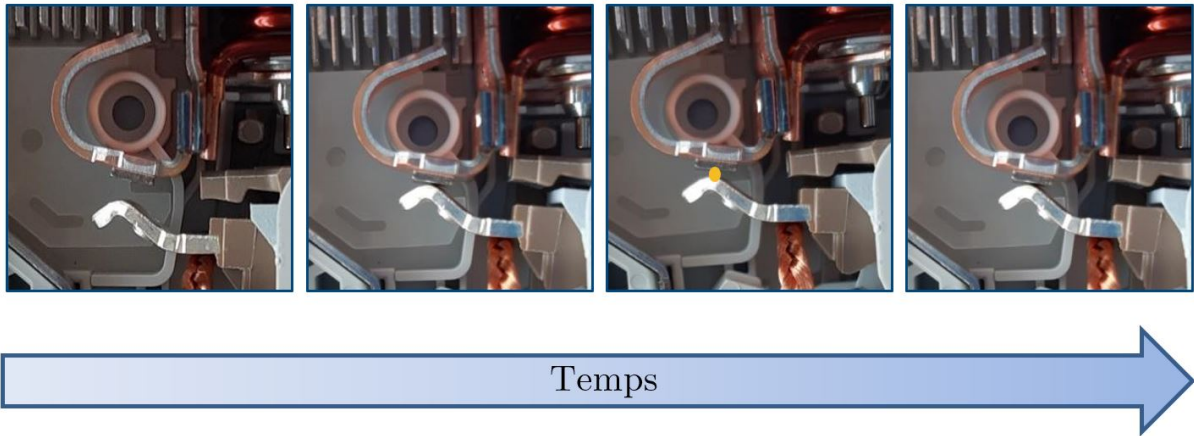


FIGURE 1.12 – Chronologie de la phase de fermeture brusque. Zoom sur les électrodes de la zone de contact. L'amplitude du rebond sur la 3ème photo a été exagérée pour que le rebond soit visible.

Détails des essais de court-circuit et forces de contact associées

Comme nous allons le voir plus tard dans ce chapitre, la force de contact avec laquelle les électrodes sont maintenues l'une contre l'autre pendant le passage du courant joue un rôle majeur dans le phénomène d'échauffement du contact. Ce paragraphe s'intéresse de ce fait à l'évolution de la force de contact durant les deux types d'essais normatifs de court-circuit, les essais « O » et les essais « CO ». La Figure 1.13 schématise pour ces deux types d'essais l'évolution temporelle de l'intensité du courant $i(t)$ et celle de la force de contact $F(t)$ associée.

Lors d'un essai « O », les électrodes sont fermées avec une force de contact F_c établie constante de l'ordre de 6 N pour le disjoncteur étudié dans ce travail de thèse. Puis à partir du moment de l'apparition du défaut ($t_{défaut}$) la force de contact diminue. Cette diminution correspond à la force de répulsion électromagnétique que nous détaillerons plus tard dans le chapitre. Cette force tend à éloigner les contacts et elle est proportionnelle au carré de l'intensité instantanée qui passe par le contact. L'ouverture mécanique des contacts par la serrure annule finalement la force de contact $F(t)$ au temps t_{open} indiqué

sur la Figure 1.13. Le reste de la coupure du courant $i(t)$ se fait grâce au déplacement de l'arc dans le déion comme décrit précédemment.

Dans le cas d'un essai « CO », un défaut électrique est présent sur la ligne mais le produit est en position OFF. Son contact est donc ouvert et la force de contact $F(t)$ est nulle. Le début de l'essai est déclenché par le réarmement du produit à l'instant t_{close} sur les graphiques de la Figure 1.13. Deux cas de figure peuvent alors se produire selon la cinématique de fermeture : une fermeture du contact sans rebond (courbe en bleu) si la vitesse de fermeture est faible, ou avec rebond mécanique (courbe en orange) si la vitesse de fermeture est assez élevée. La vitesse de fermeture dépend de deux paramètres : la force imposée par le relâchement du ressort de contact et la hauteur de lâcher. Dans les deux cas de figure la force à l'instant du premier contact est appelée « FIC » pour « force à l'instant de contact ». Le ressort de contact continue ensuite de se détendre jusqu'à son point d'équilibre mécanique. La force de contact continue ainsi à augmenter linéairement jusqu'à atteindre la force de contact F_c établie. Dans le cas d'une fermeture avec rebond, c'est dans cette phase linéaire que se produit le rebond mécanique avec une force de contact $F(t)$ qui s'annule brièvement. Une fois le ressort de contact à l'équilibre, nous retrouvons comme pour l'essai « O » une baisse de la force $F(t)$ due à la force de répulsion causée par la forte intensité de courant dans le contact. À l'instant t_{open} l'ouverture du contact conditionne finalement le reste de la coupure.

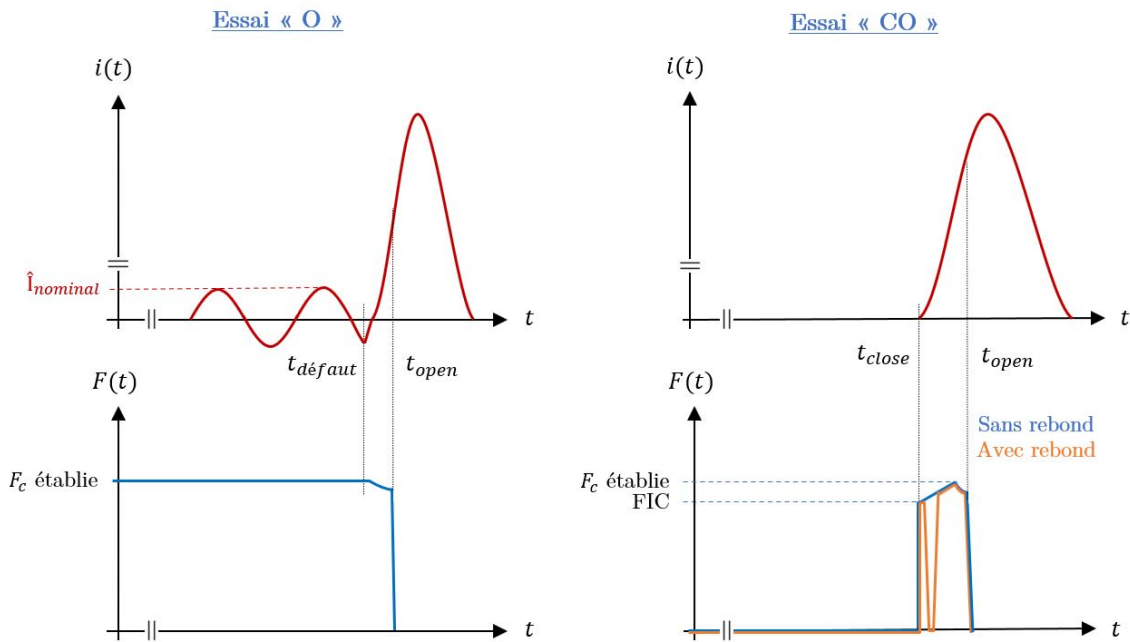


FIGURE 1.13 – Evolutions temporelles de l'intensité du courant et de la force de contact associée durant les deux types d'essais en court-circuit : les essais « Open » et « Close Open ».

Les graphiques de la Figure 1.13 illustrent et soulignent les différentes conditions de force dans lesquelles se trouvent le contact de la chambre de coupure à l'apparition du défaut et dans les dixièmes de millisecondes qui suivent. La force de contact peut être stable pour les essais « O » ou bien varier entre FIC et F_c établie pour les essais « CO » avec une possible perte totale de force dans le cas d'un rebond.

Fonctions du contact électrique

Le contact électrique du système d'ouverture est le premier maillon de la chaîne de coupure. Son bon fonctionnement conditionne donc le reste de l'opération de coupure. Lors du déclenchement du disjoncteur sur court-circuit, le contact doit gérer successivement plusieurs phases que nous allons détailler ci-dessous.

Avant l'ouverture des électrodes :

Lors d'un essai « O », le contact doit supporter le passage d'une intensité de courant bien plus élevée que son intensité nominale d'utilisation. À cela peuvent s'ajouter le rebond mécanique avec un arc électrique de rebond pour l'essai « CO ». Le contact doit ici maîtriser ces deux types d'échauffements pour éviter une soudure forte qui empêcherait son ouverture. L'échauffement du contact est illustré schématiquement sur la Figure 1.14 avec le bain fondu au centre du contact et les flèches vertes qui symbolisent les flux de chaleur générés par le contact des deux électrodes.

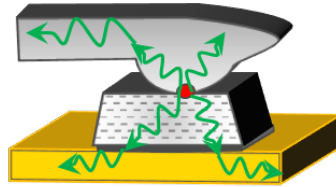


FIGURE 1.14 – Représentation schématique de l'échauffement du contact avant son ouverture.

Au début de l'ouverture (faible distance inter-électrodes) :

Lorsque le contact commence à s'ouvrir, un arc électrique de longueur encore relativement faible apparaît comme l'illustre la Figure 1.15. Cet arc reste immobile entre les deux électrodes, bien ancré dans les bains de matières fondues de l'anode et de la cathode. Le contact doit supporter au mieux la température élevée de l'arc en limitant le phénomène d'érosion qui endommage la surface des électrodes et la future qualité du contact électrique. Les projections de métaux en fusion et d'éléments métalliques vaporisés dans la chambre de coupure (illustrés sur la figure) doivent aussi être limitées pour garantir la bonne isolation électrique du gaz à l'intérieur de la chambre et éviter les ré-allumages d'arc.

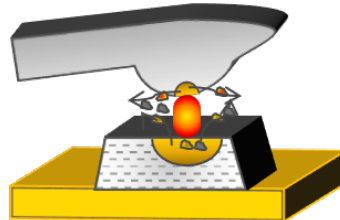


FIGURE 1.15 – Représentation schématique de l'arc immobile au début de l'ouverture des électrodes.

Déplacement de l'arc sur la pastille et son support :

L'ouverture du contact se poursuit ensuite grâce au mécanisme de la serrure. Une fois la distance inter-électrode suffisamment grande, la force de Laplace ($\vec{F}_L$ sur la figure)

devient assez importante pour permettre le déplacement de l'arc vers le reste de la chambre de coupure comme illustré sur la Figure 1.16. Les électrodes doivent durant cette phase faciliter le déplacement de l'arc sur la pastille puis sur le support de celle-ci. En effet plus le déplacement de l'arc vers le reste de la chambre de coupure est rapide, moins il y aura d'érosion, de projection de métaux fondus et de vapeurs métalliques. Cela est décisif dans les deux autres fonctions du contact électrique : éviter le ré-allumage de l'arc et assurer une bonne tenue diélectrique après coupure.

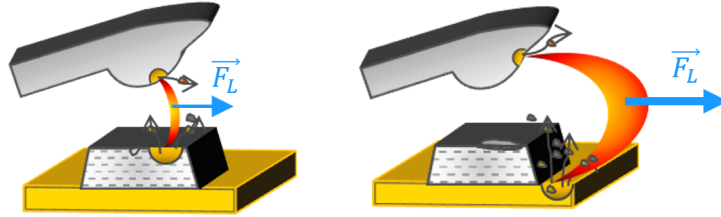


FIGURE 1.16 – Représentation schématique du déplacement de l'arc sur la pastille et sur son support. La force de Laplace à l'origine du déplacement est notée $\vec{F}_L$.

1.2 Échauffement du contact électrique

Après avoir vu de manière macroscopique les fonctions du contact pendant les essais de court-circuit, nous allons l'étudier d'un point de vue microscopique et décrire les différents phénomènes physiques mis en jeu. Comme nous allons le voir tout au long de cette partie 1.2. Échauffement du contact électrique, l'étude du contact électrique réunit beaucoup de domaines scientifiques : l'électrotechnique, l'électromagnétisme, la science des matériaux, la thermique, la mécanique et la physique de l'arc.

1.2.1 Notions de surfaces de contact apparente, mécanique et réelle

Avant d'entrer plus en détail sur les phénomènes physiques causant l'échauffement du contact, il est important de définir les notions de surfaces de contact apparente, mécanique et réelle [2][8]. En effet si nous observons en détail un contact électrique aux moyens d'un instrument optique, nous voyons la « surface de contact apparente » symbolisée par la surface en pointillés noirs sur la Figure 1.17. Mais en réalité, et comme nous pouvons le voir sur la vue de face de ce schéma explicatif, il n'y a que quelques endroits où les deux surfaces de contact se touchent réellement. Ce sont les « surfaces de contact mécaniques » symbolisées en vert sur le schéma de la vue du dessus. Elles dépendent de la morphologie des deux surfaces (rugosité, érosion), de la force de contact F et de la dureté des matériaux de contact. Sur ces surfaces de contact mécaniques peuvent se trouver des couches de corrosion ou de contaminations externes qui sont non conductrices et qui réduisent les surfaces à des surfaces de contact où passe effectivement le courant. Ce sont les « surfaces de contact réelles », qui sont habituellement nommées « spots de contact ».

Dans la suite de ce manuscrit, et pour pouvoir comparer les résultats plus facilement, ces surfaces de contact réelles seront regroupées pour en obtenir une unique de forme circulaire, et qui peut être caractérisée par son rayon équivalent « a ». Cette surface de contact équivalente et ses hypothèses seront justifiées plus tard dans le chapitre dans la section définissant la résistance d'un contact multi-strictions. L'ordre de grandeur du rayon équivalent « a » est de quelques dizaines à quelques centaines de μm .

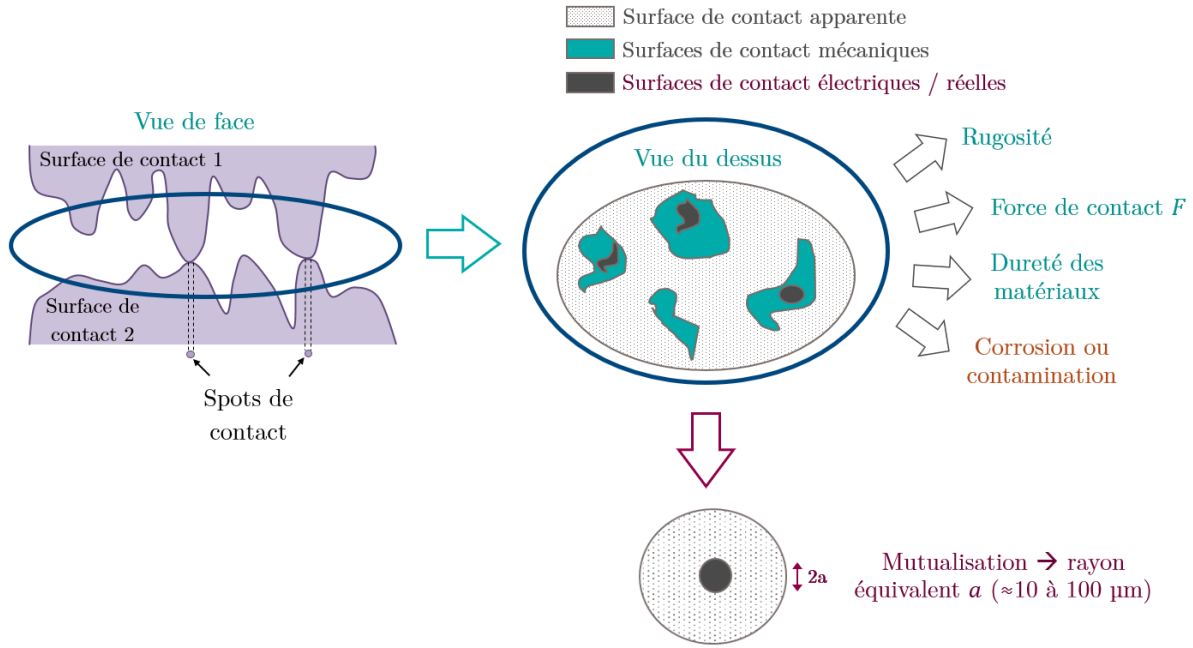


FIGURE 1.17 – Schéma explicatif de la notion de surfaces de contact apparente, mécanique et réelle. La présence de couches de corrosion ou de contaminations externes réduit les surfaces de contact mécaniques à des surfaces de contact réelles.

Comme nous venons de le voir la force de contact F influe sur la taille de la surface de contact mécanique, donc également sur la taille de la surface de contact réelle. Pour établir une relation entre le rayon de la surface de contact réelle et la force de contact F , il faut poser deux hypothèses que nous justifions du fait de notre cadre expérimental :

- Les aspérités des surfaces en contact sont soumises au régime de déformation plastique. En effet les forces de contact que nous avons utilisées pour ce travail de thèse sont assez élevées pour ne plus être dans le régime de déformation élastique. Nous avons vérifié cette hypothèse grâce à la relation présente dans la monographie [2]. Elle indique que dans le cas d'une déformation purement plastique, le rayon de la surface réelle de contact « a » est proportionnel à la racine de la force de contact F .
- Les surfaces de contact sont considérées comme propres au moment de l'essai, c'est-à-dire dépourvue de couche de corrosion ou de contamination externe qui influeraient sur les résultats des tests électriques [2]. La surface de contact mécanique peut donc être assimilée à la surface de contact réelle. Nous faisons cette hypothèse car le matériau de contact utilisé pour ce travail est l'argent. Il n'est que très peu sujet à l'oxydation dans l'air et son film d'oxyde Ag_2O est facilement brisé par la mise en contact ou dégradé thermiquement à partir de 150°C à 200°C en fonction des auteurs [2][5][9]. L'argent est cependant sensible à la sulfuration, dans le cas d'une

activité industrielle par exemple [10]. Son film Ag_2S augmente ainsi lentement du fait de la faible teneur en sulfure de l'air. Pour avoir un ordre de grandeur, Holm indique dans son livre [2] qu'une concentration en sulfure d'hydrogène H_2S inférieure à 10^{-9} ne dégrade pas la qualité du contact électrique. Slade indique qu'il est courant de voir en industrie des surfaces de contact en argent noircies par un film d' Ag_2S et qui continuent de fonctionner correctement car le film très mou est facilement brisé grâce à la force de contact [9]. Par précaution, dans ce travail de thèse, un protocole de nettoyage a tout de même été mis en place avant chaque mise en contact des électrodes. Ce protocole sera expliqué dans le chapitre 3 et permet de réduire les éventuels films et les contaminations externes. Cette hypothèse de contacts propres sera également vérifiée grâce à l'adéquation entre nos résultats expérimentaux et les résultats de simulation avec un modèle de surfaces de contact propres.

Dans le cas d'une déformation purement plastique entre deux surfaces de contact propres comme c'est le cas dans nos essais, le rayon équivalent de la surface de contact réelle « a » est égal à celui de la surface de contact mécanique et peut être défini par la formule (1.4) selon [9][11][12][13] :

$$a = \sqrt{\frac{F}{\xi \cdot \pi \cdot H}} \quad (1.4)$$

Avec a le rayon de la surface de contact réelle en mm , F la force de contact totale en N , H la dureté des matériaux de contact en $N.mm^{-2}$, et ξ un coefficient de déformation empirique et correctif qui a pour rôle la prise en compte de l'incertitude sur la valeur réelle de dureté des matériaux de contact qui est expliquée dans le paragraphe ci-dessous.

Il est à noter que pendant un essai électrique, le passage du courant va provoquer l'échauffement des matériaux en contact. La caractéristique de dureté des matériaux va donc également évoluer au fil de l'essai. Dans la littérature, nous trouvons facilement des valeurs de dureté mesurées à température ambiante. Mais comme la mesure de dureté en fonction de la température est très délicate à réaliser, surtout à des températures proches de la fusion, nous n'avons trouvé que très peu de sources exploitables. De plus chaque matériau diffère étant donné sa composition et sa microstructure. Le comportement de dureté des matériaux utilisé pour ce travail ne peut donc qu'être approché par les résultats trouvés dans la littérature. Cette difficulté est à prendre en compte pour l'utilisation de cette formule dans un modèle de simulation.

1.2.2 Résistance de contact et échauffement

Comme nous avons pu le voir précédemment, la surface de contact réelle est très petite avec un rayon de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de μm . Cela forme un goulot où toutes les lignes de courant des électrodes de contact doivent passer. Cette constriction est illustrée sur la Figure 1.18 qui représente schématiquement les lignes de courant traversant le contact entre les électrodes utilisées pour ce travail de thèse.

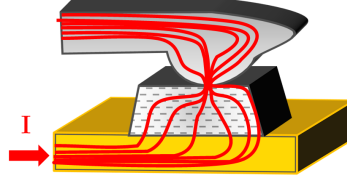


FIGURE 1.18 – Représentation de la constriction des lignes de courant au passage du contact électrique.

La densité de courant devient très importante localement, tout comme la puissance volumique dissipée localement selon l'équation (1.5) :

$$p_v = \rho \cdot j^2 \quad (1.5)$$

Avec p_v la puissance volumique dissipée localement en $W.m^{-3}$, ρ la résistivité du matériau en $\Omega.m$ et j la valeur instantannée de la densité de courant en $A.m^{-2}$.

Lorsque nous intégrons cette grandeur locale à la zone de contact, nous obtenons la puissance thermique émise par le contact par effet Joule selon l'équation :

$$p = R_{striction} \cdot i^2 \quad (1.6)$$

Avec p la puissance instantannée dissipée par le contact en W , $R_{striction}$ la résistance de contact en Ω et i la valeur instantannée du courant traversant le contact en A .

Le contact est donc le siège d'une source de chaleur qui va être évacuée principalement par conduction dans les électrodes de contact. Cette chaleur pourra être à l'origine de la fusion des matériaux si la dissipation par conduction n'est pas assez efficace.

Définition et expression de la résistance de contact dans une striction

La résistance de contact est définie comme étant la résistance due à la striction des lignes de courant lors de leur passage d'un conducteur à un autre [2][8][9][13]. La Figure 1.19 représente deux cylindres conducteurs C_1 et C_2 de rayon « B » séparés par une surface de contact apparente A_a . Le rayon de la surface de contact réelle où passent en réalité les lignes de courant est appelé « a » comme dans les paragraphes précédents. La résistance mesurée entre les points de prise de potentiel a et b est ainsi égale à :

$$R_{ab} = R_{striction} + R_{ab}^0 \quad (1.7)$$

Avec R_{ab} la résistance mesurée entre les points a et b , $R_{striction}$ la résistance provoquée par la constriction des lignes de courant et R_{ab}^0 la résistance du matériau s'il n'y avait aucune constriction entre les deux points de mesure a et b .

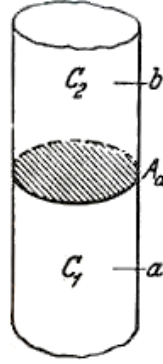


FIGURE 1.19 – Représentation schématique de la surface de contact apparente A_a entre deux cylindres semi-infinis de même métal [2].

En ce qui concerne le gradient de potentiel entre les points a et b de la Figure 1.19, la constriction des lignes de courant est également la cause d'un gradient de potentiel bien plus élevé aux alentours de la surface de contact que dans les zones éloignées du contact, à une distance bien plus grande que le rayon de contact « a ». La Figure 1.20 représente les lignes de courants ainsi que les surfaces équipotentiels dans le contact de la Figure 1.19. Les deux surfaces équipotentiels A_e symbolisent les limites de ce que nous pouvons considérer comme la zone de constriction, la distance entre la surface de contact et ces surfaces étant du même ordre de grandeur que le rayon « B » des cylindres. La résistance R_{ab}^0 est ainsi faible, voire souvent même négligeable devant la résistance totale R_{ab} . La définition exacte des endroits de prise de potentiel (points a et b de la Figure 1.19) n'est donc pas nécessaire à partir du moment où elles sont assez éloignées de la constriction.

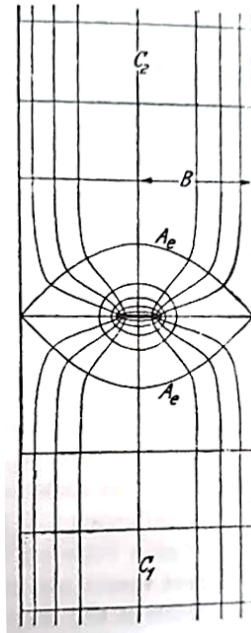


FIGURE 1.20 – Lignes de courant et surfaces équipotentiels dans une constriction de courant entre deux conducteurs C_1 et C_2 . Les deux surfaces A_e symbolisent la limite de la zone de constriction [2].

Dans sa monographie, Holm décrit deux types de constriction :

- La « constriction longue » si le rayon des conducteurs « B » est bien plus grand que celui de la surface réelle de contact « a ». Dans ce cas, la résistance R_{ab}^0 des conducteurs peut être négligée,
- et la « constriction courte » si le rayon « B » est comparable au rayon « a ». Ici la résistance R_{ab}^0 ne peut plus être négligée.

Pour ce travail de thèse, nous serons dans la configuration d'une constriction longue. L'éventuelle résistance R_{ab}^0 pourra donc être négligée.

Pour définir cette résistance de contact $R_{striction}$ et établir sa célèbre formule, Holm utilise un modèle ellipsoïdal. Il obtient ainsi la résistance de contact totale :

$$R_{striction}(\mu) = \frac{\rho}{\pi a} \arctan \left(\frac{\sqrt{\mu}}{a} \right) \quad (1.8)$$

Avec $R_{striction}$ la résistance due à la constriction des lignes de courant en Ω , $\sqrt{\mu}$ la distance entre la surface de contact et la surface équipotentielle en m , ρ la résistivité des matériaux de contact en $\Omega.m$ et a le rayon de la surface réelle circulaire de contact en m .

Pour une constriction longue et dans le cas où le point de prise de potentiel est assez éloigné de la zone de contact réelle, nous avons $\sqrt{\mu} = \infty$, et nous retrouvons l'équation pour un côté de la constriction :

$$R_{\frac{1}{2}striction} = \frac{\rho}{4a} \quad (1.9)$$

Avec $R_{striction}$ la résistance due à la constriction des lignes de courant en Ω , ρ la résistivité des matériaux de contact en $\Omega.m$ et a le rayon de la surface réelle circulaire de contact en m .

De ce résultat découle la formule très connue de Holm pour l'ensemble du contact :

$$R_{striction} = \frac{\rho}{2a} \quad (1.10)$$

Cette formule peut également s'appliquer à un contact électrique entre deux conducteurs de nature différente :

$$R_{striction} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (1.11)$$

Avec ρ_1 et ρ_2 les résistivités des deux matériaux de contact en $\Omega.m$

Répartition du courant dans le contact en régime établi

Comme évoqué au début de cette partie sur la résistance de contact, les lignes de courant subissent une forte constriction dans la zone du contact électrique. Holm donne l'expression de la densité de courant sur la surface de contact en fonction de sa distance r par rapport au centre de la surface de contact, toujours dans le cas d'une surface de contact circulaire, dans le modèle ellipsoïdal :

$$j(r) = \frac{i}{2\pi a} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 - r^2}} \quad (1.12)$$

Avec j la densité de courant sur la surface de contact en $A.m^{-2}$, r la distance radiale à partir du centre de la surface de contact en m , i la valeur instantanée de l'intensité de courant passant par le contact en A et a le rayon de la surface réelle de contact en m .

En intégrant cette expression, nous pouvons montrer que seulement la moitié du courant passe à travers le disque de rayon $r = 0.866 a$. L'autre moitié du courant passe uniquement sur les bords du disque, ce qui prouve la forte densité de courant sur le bord du contact.

Résistance d'un contact multi-strictions

Dans les deux paragraphes précédents, nous avons examiné le cas d'une constriction unique. Cependant le contact correspond en réalité à une multitude de spots de contact comme l'illustre la Figure 1.17. Holm en 1929 dans la première édition de son livre puis Greenwood en 1966 dans son article [14] ont présenté deux modèles pour calculer la résistance totale d'un contact multi-strictions et apprécier l'impact des différentes strictions, comme cela est résumé dans [8].

Le modèle de Holm est un premier modèle simplifié qui se base sur plusieurs hypothèses. Il considère un contact représenté à la Figure 1.21 et constitué de n spots circulaires de rayon a régulièrement répartis sur la surface apparente de rayon r et avec une distance $2l$ entre deux spots voisins. Si les microstrictions sont assez éloignées les unes des autres, c'est-à-dire $l \gg a$, le modèle décrit la résistance totale de contact selon la formule simple et couramment utilisée :

$$(R_{multi-strictions})_{Holm} = \frac{\rho}{2na} + \frac{\rho}{2r} \quad (1.13)$$

Avec $(R_{multi-strictions})_{Holm}$ la résistance de contact totale (pour les deux membres du contact) selon le modèle de Holm en Ω , ρ la résistivité des matériaux de contact en $\Omega.m$, n le nombre de spots circulaires et a leur rayon en m et r le rayon de la surface apparente en m .

Le premier terme de la résistance totale de contact correspond à la résistance induite par les n microstrictions de rayon a mises en parallèles et le deuxième à la résistance globale de la macrostriction en milieu semi-infini.

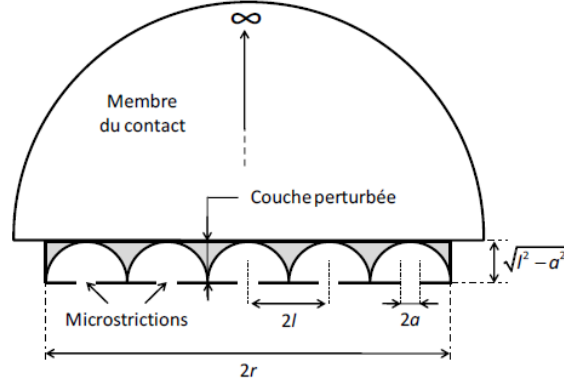


FIGURE 1.21 – Microstrinctions circulaires régulièrement réparties entre les deux contacts semi-infinis. Les zones grises représentent les espaces vides entre les deux électrodes [8].

Greenwood a ensuite généralisé le modèle de Holm en considérant des spots circulaires de tailles différentes les uns des autres et non uniformément répartis. Chaque spot i a un rayon a_i et est situé à une distance d_{ij} du spot j de rayon a_j . La résistance totale de contact est selon le modèle de Greenwood :

$$(R_{multi-strinctions})_{Green} = \frac{\rho}{2n\bar{a}} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i \neq j} \sum \frac{1}{d_{ij}} \quad (1.14)$$

Avec $(R_{multi-strinctions})_{Green}$ la résistance de contact totale selon le modèle de Greenwood en Ω , ρ la résistivité des matériaux de contact en $\Omega.m$, n le nombre de spots circulaires, $\bar{a}$ le rayon moyen des spots en m et d_{ij} la distance entre les deux spots i et j en m .

Ici le premier terme résulte de la mise en parallèle des résistances de striction de chaque spot définies par (1.10). Le deuxième terme correspond à la résistance d'interaction entre les différents spots. Greenwood, en faisant l'hypothèse de spots uniformément répartis pour correspondre au modèle de Holm ($d_{ij} = l$), étudie dans son article [14] l'influence du rapport entre l et a . Pour cela, il fait varier les rayons a des spots en maintenant les positions des centres des spots inchangées (l est constant). Si l/a est élevé (bordures des spots assez éloignées les uns des autres) la résistance de striction en parallèle devient prépondérante devant celle d'interaction. Inversement si l/a est faible, le terme de résistance parallèle est réduit et la résistance d'interaction devient largement majoritaire.

Revenons maintenant à la somme des surfaces de contact réelles illustrée à la Figure 1.17 et que nous avons évoquée précédemment dans ce chapitre. En accord avec les formules de résistances multi-strinctions de Holm et Greenwood, cette simplification implique la prédominance des premiers termes (mise en parallèle des résistances des n spots) par rapport aux deuxièmes termes qui deviennent négligeables. La somme des surfaces de

contact réelles repose sur deux hypothèses assez semblables, en fonction du modèle pris en compte :

- La somme des rayons a des n spots est négligeable devant le rayon r de la surface apparente de contact (modèle de Holm), i.e. les spots de contact sont éloignés les uns des autres.
- Le rayon moyen a des spots est négligeable devant la distance l entre les spots (modèle de Greenwood).

Nous vérifierons ces hypothèses dans le chapitre 4 lorsque nous comparerons les résultats expérimentaux et les simulations effectuées pour l'échauffement d'un contact à surface constante.

1.2.3 Impact de la fréquence du courant sur la résistance de contact

L'article [15] décrit la dépendance entre la résistance de constriction $R_{striction}$ et la fréquence du signal de courant injecté dans le contact électrique en régime permanent. En effet la formule de Holm (1.10) est limitée au phénomène de conduction en DC. Sa validité pour des ondes AC n'est pas aussi évidente car l'augmentation de la fréquence du signal fait apparaître le phénomène d'effet de peau. Dans ce cas, les lignes de courant sont concentrées en périphérie du conducteur et en périphérie de la surface en contact, dans une épaisseur δ nommée « épaisseur de peau ». Pour un régime permanent, elle est calculée selon l'équation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (1.15)$$

Avec δ l'épaisseur de peau en m , ρ la résistivité du matériau en $\Omega.m$, f la fréquence du signal en Hz et μ_0 la perméabilité magnétique du vide en $T.m.A^{-1}$.

Le signal de courant pour notre application a une fréquence proche de 50 Hz dans sa phase ascendante. D'après l'équation (1.15), pour un signal sinusoïdal de fréquence 50 Hz, l'épaisseur de peau δ est égale à 9,42 mm pour le cuivre et 8,97 mm pour l'argent, ce qui est bien plus élevé que les dimensions caractéristiques des conducteurs et de la zone de constriction. Cette formule n'est cependant valable qu'en cas de régime établi. Elle correspond en fait à la profondeur de pénétration maximum des courants dans les conducteurs. Dans notre cas, nous nous intéressons au régime transitoire de l'effet de peau, sur la première demi-alternance du courant. Les valeurs d'épaisseur de peau peuvent y être réduites si la variation du courant est très importante, ce qui se traduirait par une augmentation de la résistance de contact avec la dérivée du courant. Meyer a illustré dans sa thèse [16] ce phénomène de régime transitoire de l'effet de peau. Il a calculé la répartition des lignes de courant dans une électrode en cuivre de 1 cm de rayon après injection d'un échelon de courant à travers une surface de contact de rayon $a = 50 \mu m$. Dans cette configuration, le régime établi est atteint pour 300 ms.

Pour vérifier que le régime de l'effet de peau soit bien établi dans nos conditions expérimentales, nous avons mesuré sur un contact à surface constante et avec les électrodes habituelles, la résistance de contact à l'origine pour les différentes variations de courant que nous utilisons pour ce travail de thèse. Nous avons vu que la résistance à l'origine était indépendante de la dérivée du courant injecté. L'éventuel effet de peau est donc bien en régime établi. Or puisque notre onde de courant avoisine les 50 Hz, l'épaisseur de peau δ est supérieure aux dimensions du contact et des conducteurs, nous pouvons ainsi négliger ce phénomène dans nos interprétations et nos modélisations.

1.2.4 Impact de la force de contact sur la résistance de contact

La force de contact a une grande importance dans le phénomène d'échauffement du contact électrique. En effet cette force a un impact sur la résistance de striction qui est elle-même à l'origine de l'échauffement par pertes Joule. Nous avons vu grâce à l'équation (1.4) de la section 1.2.1. que le rayon a de la surface de contact dépendait de la force de contact F . Ce rayon a est de plus inversement proportionnel à la résistance de contact $R_{striction}$ selon la formule (1.10) pour un contact mono-striction. En combinant ces deux équations, nous obtenons l'équation (1.16) qui relie la résistance $R_{striction}$ pour un contact mono-striction à la force F de contact totale [9][10]. Nous pouvons y constater qu'en augmentant la force de contact, la résistance de constriction et donc les échauffements sont réduits. Cette tendance est confirmée par l'article [17] pour différents matériaux dont l'argent.

$$R_{striction} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\xi \cdot \pi \cdot H}{F}} \quad (1.16)$$

La Figure 1.22 illustre le résultat du calcul de la résistance de contact mono-striction en fonction de la force de contact pour différents matériaux de contact. La force utilisée est celle mesurée en essai Brinell, et le coefficient de déformation ξ est fixé à 1. La résistivité ρ ainsi que la dureté H étant sensibles aux différences de température, les calculs sont réalisés pour des valeurs à température ambiante.

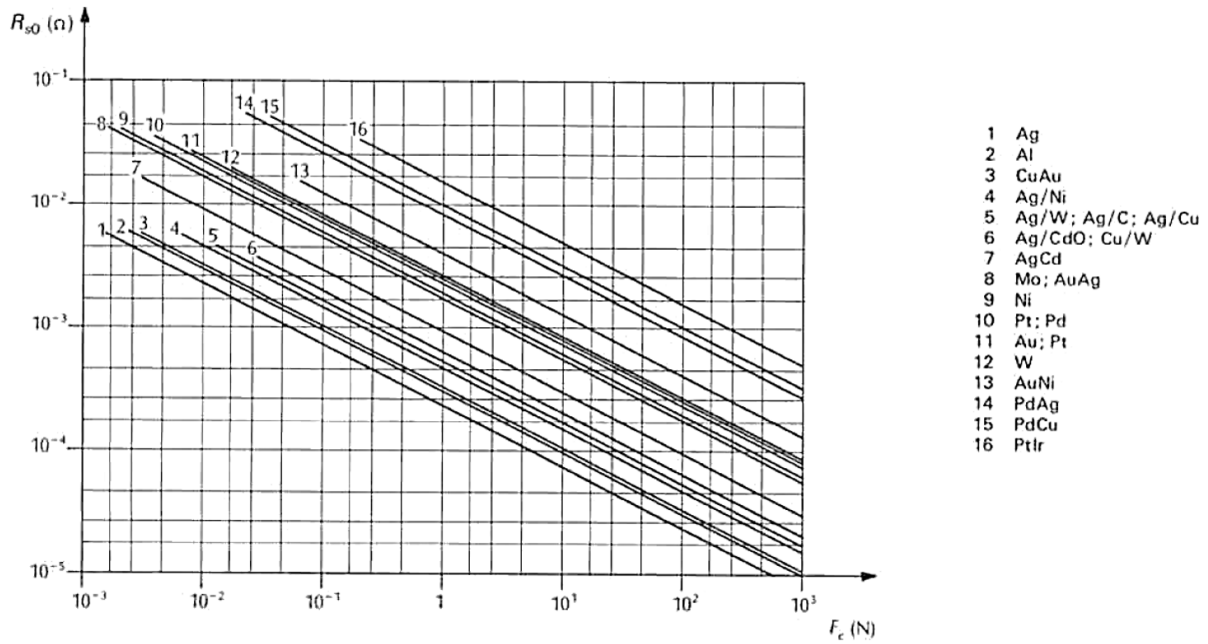


FIGURE 1.22 – Résistances de constriction à température ambiante en fonction de la force de contact F pour différents matériaux de contact. Les résistances de constriction sont calculées grâce à l'équation (1.16). Le coefficient ξ est fixé à 1 et la dureté utilisée est la dureté Brinell [18].

La formule (1.16) et la Figure 1.22 associée sont utilisables dans l'hypothèse d'un contact métallique « propre », c'est-à-dire sans influence d'un film d'oxyde ou de contamination externe. En cas de présence d'un film, la résistance de ce dernier vient s'ajouter à la résistance de constriction précédemment décrite. La Figure 1.23 représente l'allure de la résistance de contact totale en fonction de la force de contact appliquée pour un contact en TiB_2 . Pour de faibles forces de contact, inférieures à 0.1 N, la résistance de film est prépondérante. Puis lorsque la force de contact augmente, de 0.1 à 0.45 N, les aspérités de surface s'écrasent davantage les unes contre les autres et les éventuels films ont tendance à se dégrader. La surface de contact réelle augmente et les lignes de courant subissent alors moins de constriction, ce qui réduit la résistance de contact. Cette zone correspond aux droites du graphique en échelle log-log de la Figure 1.22. Finalement au-delà de 0.45 N, une force de contact optimale est atteinte. La résistance de constriction devient stable et faible car la surface de contact réelle a atteint une valeur élevée, ce qui limite fortement le phénomène de constriction des lignes de courant. Seule l'éventuelle résistance des matériaux le long du passage du courant subsiste si la mesure de la tension de contact est réalisée sur les amenées de courant. Le principe de cette mesure sera expliqué au chapitre 3.

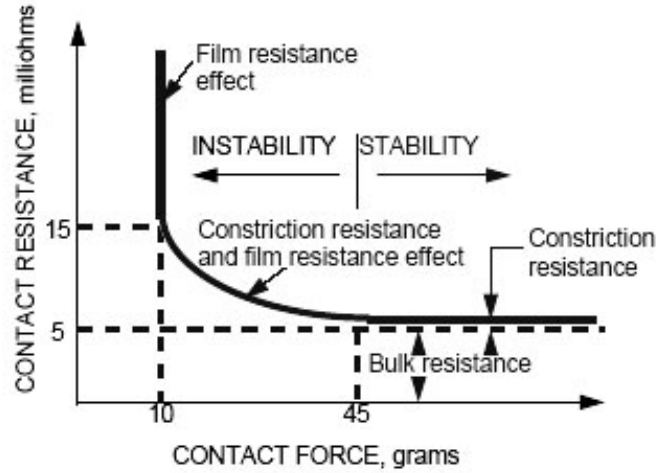


FIGURE 1.23 – Résistance de contact totale en $m\Omega$ en fonction de la force de contact exprimée ici en grammes, pour des électrodes de contact en TiB_2 recouvertes d'un film de surface [19].

1.2.5 Force de répulsion

La section précédente a mis en avant la relation entre force de contact et résistance de contact. Lorsque la force de contact augmente, la résistance de contact ainsi que les échauffements par pertes Joules diminuent. Cependant durant le passage du courant dans le contact électrique, un autre phénomène physique entre en jeu. Il s'agit de la force électromagnétique de répulsion qui diminue la force totale de contact, ce qui augmente la résistance de contact et les échauffements associés. La force de répulsion est la somme de deux forces d'origine différente.

La première force de répulsion est liée à l'effet de boucle due aux amenées de courant. La Figure 1.24 représente le mécanisme d'action de cette force sur l'électrode mobile (électrode de droite sur la figure). Le même principe s'applique sur l'électrode fixe à gauche. Le passage du courant dans l'électrode fixe induit un champ électromagnétique perpendiculaire au plan de la figure sur l'électrode mobile. L'interaction entre le courant passant dans l'électrode mobile et ce champ électromagnétique crée une force de Laplace qui a tendance à éloigner le contact mobile du contact fixe.

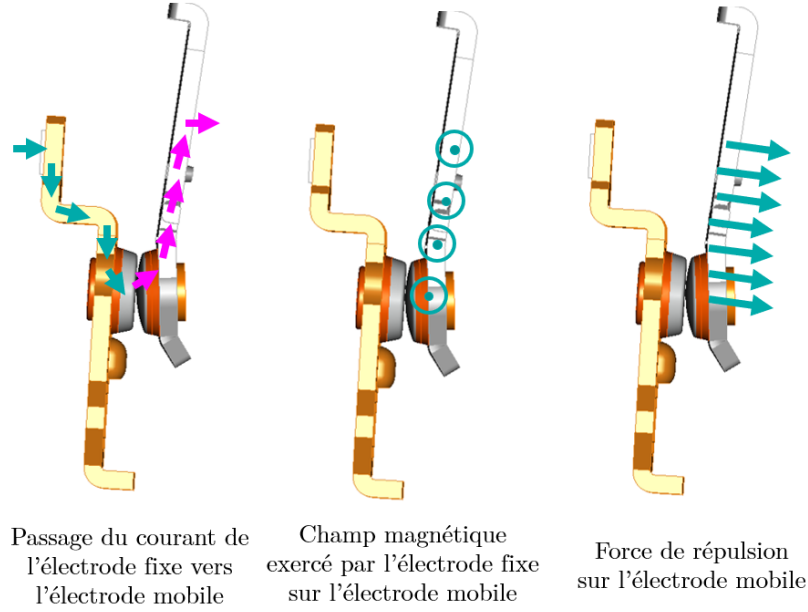


FIGURE 1.24 – Représentation du passage de courant dans les électrodes de contact et du mécanisme physique conduisant à la force de répulsion due aux amenées de courant.

Les deux références [5][20] donnent l'expression simplifiée (1.17) de cette force de répulsion. Les grandeurs utilisées dans cette formule sont illustrées sur le schéma de la Figure 1.25.

$$F_{répulsion}(\text{effet de boucle}) = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \ln \left(\frac{l + R}{R} \right) \quad (1.17)$$

Avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide en $T.m.A^{-1}$, i la valeur instantanée de l'intensité traversant le contact en A , l l'espacement entre les deux amenées de courant en m et R le rayon des amenées de courant en m .

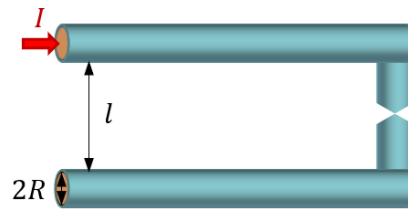


FIGURE 1.25 – Représentation schématique de la force de répulsion que subit un contact électrique à cause de l'effet de boucle entre ses deux amenées de courant cylindriques.

La deuxième composante de la force de répulsion est la force de Laplace due à la déformation des lignes de courant dans la zone de contact. Elle est par nature répulsive selon Slade [20]. La Figure 1.26 présente un zoom sur les rivets servant au contact électrique entre les deux électrodes. Dans le même principe que pour la force de Laplace due à la boucle formée par les amenées de courant, chaque ligne de courant déformée par la striction induit un champ électromagnétique sur l'électrode opposée. L'interaction entre le courant dans l'électrode opposée et ce champ électromagnétique crée une

force de Laplace qui a tendance à éloigner les électrodes de contact. Ici aussi les auteurs de [5][18][20][21] donnent une expression simplifiée de cette force de répulsion due à la constriction des lignes de courant, dans l'hypothèse d'une distribution uniforme des lignes de courant dans la striction :

$$F_{répulsion}(constriction) = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \left(\frac{R}{a} \right) \quad (1.18)$$

Avec R le rayon des amenées de courant en m et a le rayon de la surface de contact réelle en m .

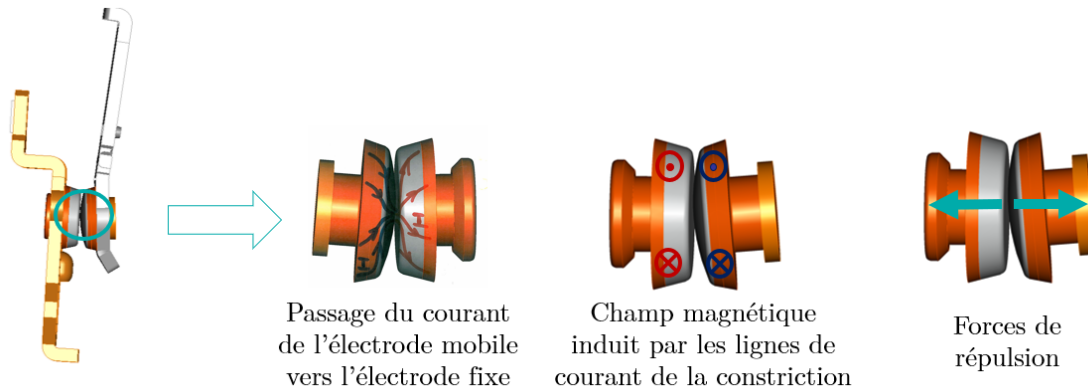


FIGURE 1.26 – Représentation du passage de courant dans les électrodes de contact et du mécanisme physique conduisant à la force de répulsion due à la striction des lignes de courant.

Les deux équations (1.17) et (1.18) traduisent l'augmentation de la force de répulsion avec le carré de l'intensité du courant. Lors d'essais de court-circuit où l'intensité du courant atteint quelques milliers d'ampères, il est ainsi primordial d'estimer et de prendre en compte cette force de répulsion car elle va diminuer significativement la force de contact totale. Estimer cette force de répulsion est donc indispensable pour dimensionner au plus juste la force de contact imposée par la serrure du produit de protection. Pour cela, Taylor et Slade ont fait en 2016 la synthèse de données expérimentales des 65 années précédentes [22]. Ils en ont déduit une relation empirique simple de la force de répulsion pour un contact fermé. Cette relation ne dépend ni du matériau et de sa géométrie ni du rayon de contact. Elle est valable pour une intensité de 1 à 200 kA, pour des contacts dans l'air ou dans le vide. La force de répulsion peut ainsi se définir simplement à partir du carré de l'intensité du courant selon la formule (1.19) :

$$F_{répulsion} = k \cdot i^2 \quad (1.19)$$

Avec k une constante égale à $4.8 \cdot 10^{-7} N.A^{-2}$ et i la valeur instantanée de l'intensité de courant traversant le contact.

En utilisant cette formule, nous pouvons estimer la force de répulsion maximale atteinte lors de nos essais au moment de l'intensité crête du courant. Le Tableau 1.1 présente ces forces pour les plages d'intensités crête utilisées lors de nos deux études, en statique

et en dynamique, dont les résultats seront présentés respectivement dans les chapitres 4 et 5.

	Intensités crêtes (A)	$F_{répulsion}$ maximum (N)	Forces de contact mécaniques (N)
Essais en statique	200 à 2000 2800	0.02 à 1.92 3.76	3, 6 et 12 6
Essais en dynamique	1400 à 3300	0.94 à 5.23	10

TABLE 1.1 – Forces de répulsion maximum atteintes pour les différentes intensités crêtes de courant testées, ainsi que les forces de contact mécaniques imposées au moment de l'intensité crête.

Pour les essais en statique, nous imposerons des forces de contact mécaniques supérieures aux forces de répulsion maximum atteintes lors de l'intensité crête. Il n'y aura donc pas d'ouverture du contact par auto-répulsion. Pour les essais en dynamique, la force de répulsion au moment de l'intensité crête à 3300 A sera plus élevée, à une valeur d'environ 5 N. Néanmoins même si la force de contact mécanique fluctue durant les deux premières millisecondes de l'essai, elle est stabilisée à environ 10 N lors de l'intensité crête, ce qui permet d'éviter l'auto-ouverture du contact due uniquement aux forces de répulsion.

Si nous revenons au thème de cette partie 1.2. Échauffement du contact électrique, la force de répulsion a aussi un impact négatif sur les échauffements. Comme la force de répulsion diminue la force de contact totale, la surface de passage du courant est réduite et la résistance de contact augmente. Les échauffements du contact par effet Joule sont ainsi plus importants, ce qui augmente les risques de collage comme nous allons le voir dans la section 1.3. Problématique de collage.

1.3 Problématique de collage

1.3.1 Origines du collage

Pour ces travaux de thèse nous avons décidé de nous focaliser sur un type de contact de coupure, celui de la zone de contact présente dans la chambre de coupure du disjoncteur modulaire de calibre 16 A et de pouvoir de coupure 10 kA. En effet des phénomènes de collage, majoritairement sans impact sur le bon fonctionnement du produit de protection selon la norme, y sont régulièrement observés. Le contact étudié est schématisé sur la Figure 1.27. Il est composé d'une électrode mobile, nommée habituellement « contact mobile », qui va se déplacer pour ouvrir le contact électrique pendant l'opération de coupure. Le contact mobile est constitué de cuivre pur (Cu) revêtu d'une couche de $5\ \mu m$ d'argent (Ag). En face se trouve l'électrode fixe, nommée « contact fixe », qui est une pastille en matériau composite à base d' Ag (fibres de graphite (C) parallèles à 4 %_{massique} dans une matrice d' Ag) soudée sur un support en acier cuivré.

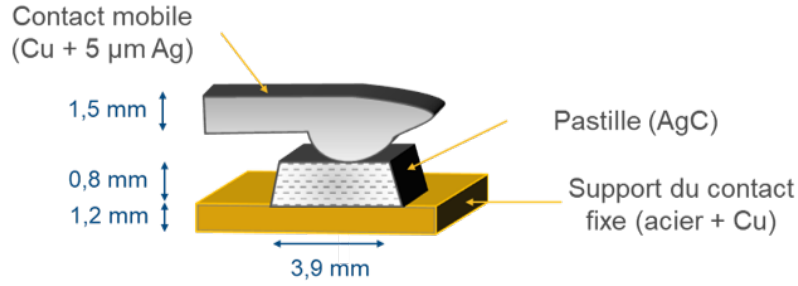


FIGURE 1.27 – Représentation schématique du contact étudié (contact de coupure du disjoncteur 16 A).

Comme nous pouvons le remarquer sur l'exemple du contact électrique sur la figure précédente, l'Ag est couramment utilisé en tant que matériau de contact car c'est un très bon conducteur électrique et thermique. Si nous le comparons au cuivre qui est couramment utilisé comme conducteur dans les installations électriques, nous obtenons les valeurs du Tableau 1.2. L'argent a une résistivité légèrement plus faible que celle du cuivre ce qui réduit les échauffements par effet Joule, et a une conductivité thermique plus élevée que celle du cuivre ce qui permet d'évacuer plus efficacement la chaleur générée par le contact par exemple. Malgré les bonnes propriétés physiques de l'argent par rapport au cuivre, le coût élevé de l'argent et sa raréfaction empêchent son utilisation globale pour tout le circuit de conduction des installations électriques. Son utilisation est réservée aux points de conduction critiques comme les contacts électriques.

	Résistivité électrique ρ_0 à 293 K ($\text{n}\Omega.\text{m}$)	Conductivité thermique λ_0 à 293 K ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Ag	15,87	429
Cu	16,78	398

TABLE 1.2 – Caractéristiques électriques et thermiques de l'argent et du cuivre à température ambiante.

Étant donné sa faible résistivité électrique, l'argent assure également une faible résistance de constriction à température ambiante. Sur la Figure 1.22, nous pouvons voir que c'est bien le contact en argent qui a la plus faible résistance de constriction parmi tous les matériaux de contact testés.

L'argent est de plus préféré au cuivre en tant que matériau de contact car il est très peu sujet à l'oxydation et son éventuel film de sulfure est mou et donc très facilement brisé mécaniquement par la force de contact, contrairement au film d'oxyde du cuivre [9].

Mis à part son coût, l'argent a néanmoins des inconvénients en tant que matériau de contact. Sa température de fusion est basse : 961 °C comparé à 1085 °C pour le cuivre par exemple. Son taux d'érosion en présence d'un arc électrique est également assez élevé par rapport à celui d'autres matériaux de contact usuels. Pour avoir un ordre d'idée, pour six arcs successifs d'intensité 12 kA crête évoluant selon une demi-onde sinusoïdale de 50 Hz, une paire d'électrodes de contact en argent s'érode de $9 \text{ cm}^3.kA^{-1}.s^{-1}$ tandis que celle en cuivre, nickel et tungstène s'érodent respectivement de 8, 0.9 et $0.2 \text{ cm}^3.kA^{-1}.s^{-1}$ [12].

La fusion à température relativement faible ainsi que le taux d'érosion important de l'argent comme matériau de contact mènent à des problématiques de collage. En effet,

comme l'illustre la Figure 1.28, si le passage du courant fait augmenter la température des surfaces en contact au-delà de leur température de fusion, les matériaux fondent. Puis lors de la baisse du courant, la température des surfaces en contact diminue ce qui entraîne la solidification de la matière fondue. Les électrodes de contact sont donc « collées » avec une certaine force de collage que nous décrirons dans la section suivante. En prenant en compte l'opération de coupure du produit dans son ensemble, ce collage peut à ce stade être qualifié de « collage potentiel ». Par la suite, si la force de déverrouillage imposée par la serrure pour ouvrir les électrodes est assez élevée pour rompre ce collage potentiel, nous parlerons de « tentative de collage ». Au contraire si cette force n'est pas suffisante, nous parlerons simplement de « collage ».

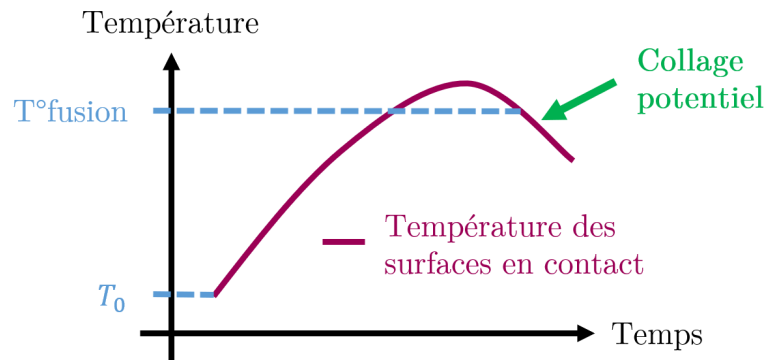


FIGURE 1.28 – Graphique représentant le principe du phénomène de collage engendré par la hausse de la température des surfaces en contact.

Dans le cas d'un collage, même si le produit de protection détecte un défaut sur la ligne électrique, les électrodes de contact resteront collées l'une à l'autre. La coupure du courant ne pourra donc pas se faire et la protection du circuit aval ne sera plus assurée. Les produits Hager étant destinés à la protection des biens (disjoncteurs) et des personnes (produits différentiels), ce cas de figure n'est pas envisageable. La problématique de collage est donc majeure pour l'entreprise.

Pour éviter les phénomènes de collage liés à la faible température de fusion et au fort taux d'érosion de l'argent pur, des matériaux composites à base d'argent sont utilisés comme électrodes de contact. Ils sont choisis en faisant un compromis suivant leur domaine d'application et les conditions de leur utilisation. Dans les disjoncteurs sujets à des phénomènes de collage, l' AgC est couramment utilisé [23][24]. D'après Féchant et Tixador [25], dans le cadre d'un collage sans arc, un contact en Ag Vs AgC a une force relative de soudure de 2 N.kA^{-1} contre 5 N.kA^{-1} pour un contact en Ag Vs Ag . En présence d'un arc, le matériau composite AgC est également un bon candidat contre le collage. En effet au-delà de 900 K les particules de graphite se subliment. Comme le bilan volumique de cette réaction est positif, la pression de l'air est localement augmentée et l'arc est donc chassé de la pastille de contact [26], ce qui préserve la pastille d' AgC d'une érosion supplémentaire en cas de stagnation de l'arc. De plus cette réaction de sublimation

laisse à la fin de l'arc une structure poreuse d'Ag. L'érosion est donc encore élevée mais cette structure a l'avantage de bien résister au collage [27]. D'autres matériaux composites sont utilisés dans les contacteurs par exemple : l'AgNi pour sa très bonne résistance à l'érosion en présence d'un arc [10] et l'AgSnO₂ pour sa bonne résistance à l'érosion face à l'arc [28] et sa bonne résistance au collage [29].

Il est à noter que nous avons donné dans le paragraphe précédent les propriétés générales des matériaux composites à base d'argent. Dans les faits et pour chaque matériau composite, ces caractéristiques varient en fonction de leur composition, de leur microstructure et de leur processus de fabrication.

Les collages rencontrés dans les produits peuvent être scindés en deux catégories en fonction de l'origine de l'échauffement qui mène à la fusion : le collage statique sans arc et le collage dynamique avec la présence d'un arc de rebond comme le présente la Figure 1.29.

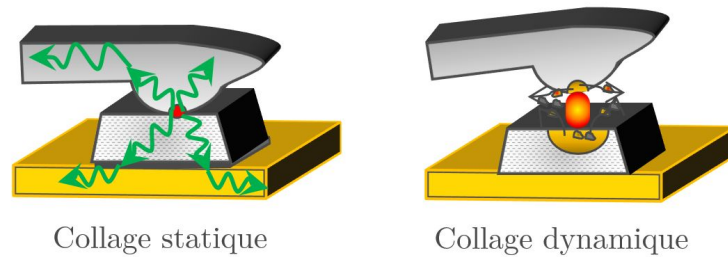


FIGURE 1.29 – Représentations du collage statique sans arc et du collage dynamique avec la présence d'un arc de rebond.

- Le collage statique : les électrodes sont l'une contre l'autre. L'échauffement des matériaux est localisé au contact entre les électrodes et est dû à la forte densité de courant dans la constriction.
- Le collage dynamique : l'échauffement provient ici en majorité de la chaleur générée par l'arc de rebond. Cet arc de rebond apparaît à la suite d'un mouvement relatif des électrodes (rotation, glissement, rebond lors de la fermeture brusque).

1.3.2 Force de collage

Définition théorique de la force de collage

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la notion de force de collage est importante pour quantifier l'intensité d'un collage potentiel. En effet, si la force de collage est trop importante et dépasse la force du mécanisme d'ouverture du contact, les électrodes vont rester collées ce qui peut engendrer de graves dégâts envers les biens et les personnes.

Différents auteurs [11][12][30] ont défini cette force de collage comme étant la force nécessaire à la rupture du contact soudé selon l'équation (1.20) :

$$F_{collage}(N) = \sigma \cdot S = \frac{H_v}{12} \cdot \pi d_f^2 \quad (1.20)$$

Avec σ la résistance à la traction du matériau en $N.m^{-2}$, S la surface fondue en m^2 , H_v la dureté Vickers du matériau en $N.m^{-2}$ et d_f le diamètre de la tâche de contact fondue en m .

L'équation (1.20) traduit une fois de plus l'importance du choix des matériaux de contact en matière d'échauffement et de collage. Leurs propriétés mécaniques influent sur la force de collage à travers les termes de résistance à la traction σ ou de dureté H_v . La force de collage dépend également de la taille de la surface soudée qui découle elle-même des propriétés électriques, thermiques et mécaniques des matériaux en contact.

En pratique la mesure de cette force de collage se réalise généralement par traction lente à température ambiante pour rendre la mesure plus facile à réaliser. Dans notre application, nous avons vu que la problématique majeure de ce phénomène de collage apparaît lorsque la force d'ouverture des contacts n'est pas suffisante pour briser les électrodes soudées. Or dans les produits de protection cette ouverture intervient rapidement après la fusion des matériaux, de telle sorte que la température du contact n'est pas forcément redescendue jusqu'à la température ambiante. Prenons l'exemple d'un collage dynamique dû à l'arc pendant le rebond à la fermeture brusque lors d'un essai « CO ». À la fin du rebond, le module magnétique va détecter le défaut et faire déclencher la serrure pour obtenir la force d'ouverture du contact. Le délai entre la fin du rebond et l'ouverture ou la tentative d'ouverture du contact est de l'ordre de 1 *ms*. Sur gabarit expérimental, la force de collage devrait donc être mesurée à ce moment-là, à température de contact réelle.

Pour souligner la différence entre une mesure au moment de l'obtention de la force d'ouverture et une mesure après essai lorsque la température est redescendue à température ambiante, nous reprenons l'équation (refeq-20) et nous voyons que la force de collage dépend de la dureté des matériaux soudés. Or, la dureté des matériaux diminue avec l'augmentation de la température [29][31]. La température ambiante après essai étant plus faible que celle au moment de l'obtention de la force d'ouverture, la dureté des matériaux soudés est donc également plus importante. A la fin de l'essai, lorsque le contact est redevenu à température ambiante, la force de collage mesurée sera toujours plus élevée que celle au moment de l'obtention de la force d'ouverture, dans notre exemple environ 1 *ms* après la fin du rebond.

Comme nous le verrons dans le chapitre 3, nous mesurerons également la force de collage à température ambiante sur le gabarit « contact électrique dynamique », environ 250 *ms* après la fin du passage de l'onde de courant dans le contact. Ce délai nous est en effet imposé par le temps de réponse du système de commande de la partie motorisée du gabarit. Les valeurs mesurées pourront donc être considérées comme supérieures aux valeurs de force de collage au moment de l'ouverture des contacts dans le produit. Mais

elles sont une bonne indication pour le dimensionnement de la force d'ouverture minimum que doit imposer la serrure du produit de protection.

Validation expérimentale de la relation

Selon la définition théorique (1.20), la force de collage est proportionnelle à la dureté du matériau et à l'aire de la surface soudée. Le livre [9] vérifie cette relation pour un contact en aluminium en traçant la force de collage en fonction d'une plage de surface soudée allant d'environ 50 à 400 μm^2 ce qui correspond à un rayon soudé de 4 à 11 μm environ (Figure 1.30). La valeur de la pente de la droite de régression linéaire tracée sur la figure est de l'ordre de 100 N.mm^{-2} , ce qui correspond bien à la résistance à la traction de l'aluminium selon le livre [29].

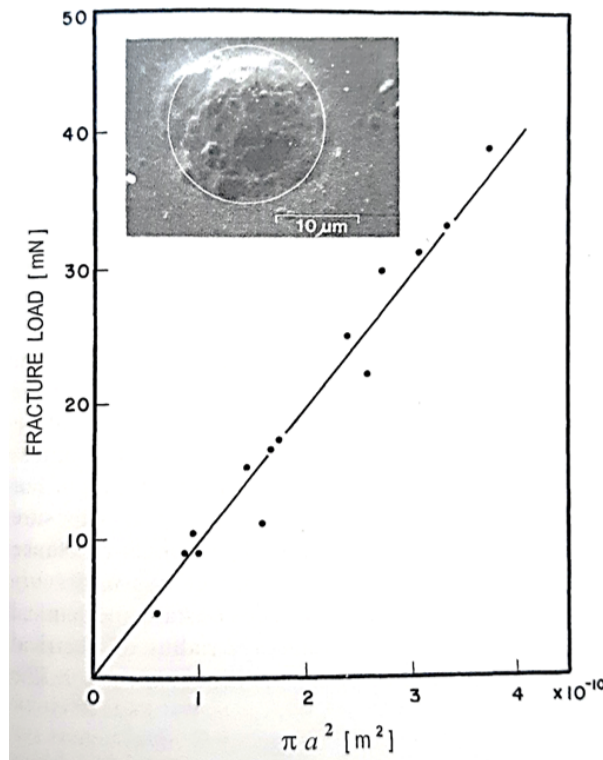


FIGURE 1.30 – Force de collage mesurée en fonction de la surface soudée sur un contact en aluminium propre. La droite en trait plein est issue d'une régression linéaire sur l'ensemble des points de mesure. Figure extraite du livre [9].

Dans son article [11], Sato a également vérifié expérimentalement cette formule avec plusieurs matériaux de contact dont l'argent et le cuivre. Il a tracé les forces de collage mesurées pour chacun des matériaux en fonction du produit entre le carré du diamètre soudé et la dureté du matériau (Figure 1.31). La ligne noire est tracée à partir de l'équation (1.20). Elle démontre une bonne concordance entre cette définition théorique de la force de collage et les valeurs mesurées expérimentalement pour l'argent et le cuivre qui sont les deux matériaux présents dans les électrodes de contact testées dans le cadre de cette thèse. Nous pouvons également noter des écarts plus importants entre valeurs théoriques et expérimentales pour les alliages de cuivre ($\text{Cu} - \text{Co}$, $\text{Cu} - \text{Ni}$ et $\text{Cu} - \text{Pd}$).

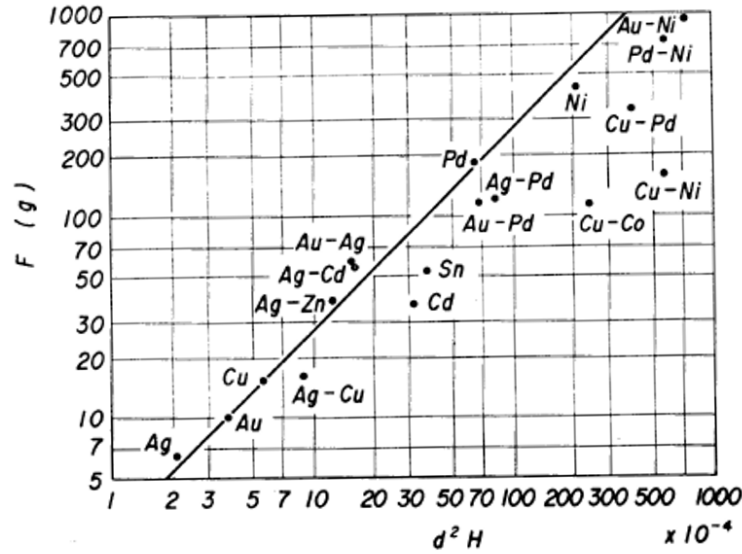


FIGURE 1.31 – Forces de collage de différents matériaux mesurées en fonction du produit entre le carré du diamètre soudé et la dureté du matériau de contact. La ligne est tracée à partir de l'équation (1.20) [11].

Les mesures de force présentées dans [9] et [11] ont été réalisées par traction lente après essai, lorsque le matériau est revenu à température ambiante. Il s'agit donc d'une mesure de force de collage à froid comme cela est couramment réalisé. Les surfaces soudées ont été mesurées optiquement après l'arrachage de la soudure. Cette mesure a également été vérifiée par calcul à partir de la formule de Holm (1.10) et du rapport $\frac{U_{contact}}{I} = R_{striction}$ enregistré à l'intensité crête. Il n'y a pas de précision dans [11] quant à la détermination de la dureté H de chaque matériau, la caractérisation la plus spécifique étant une mesure directe de dureté sur les matériaux utilisés.

1.3.3 Approche de l'étude sur la problématique de collage

Prenons comme base les graphiques de la Figure 1.13 représentant les évolutions temporelles de l'intensité du courant et de la force de contact durant les essais « O » et « CO ». Nous pouvons maintenant compléter les caractéristiques de ces deux types d'essais en indiquant l'éventuel type de collage qui peut s'y produire avant l'ouverture du contact avec l'arc de coupure, ainsi que l'origine de ce collage. La Figure 1.32 synthétise les différentes configurations d'essais menant aux collages statique et dynamique.

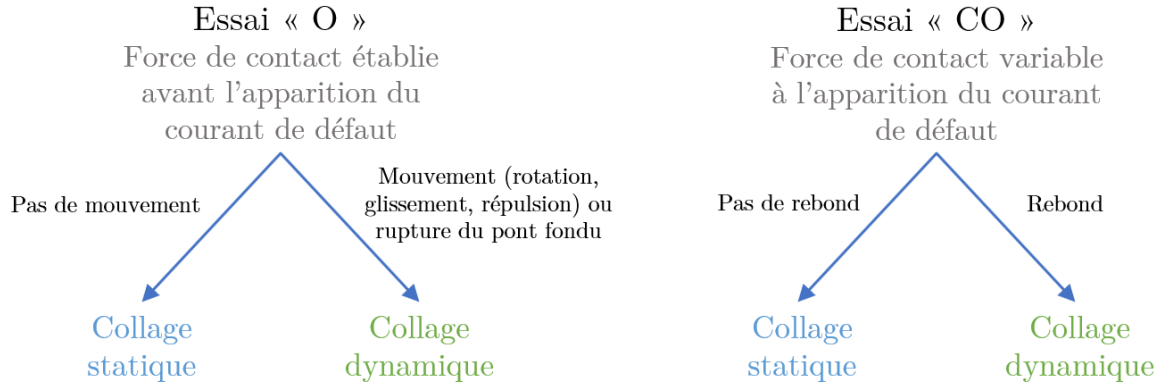


FIGURE 1.32 – Diagramme synthétisant les différentes configurations d'essais menant aux collages statique et dynamique.

Pour les essais de type « O », la force de contact est établie avant l'apparition du courant de défaut. Si pendant l'essai les électrodes restent fermées, l'échauffement du contact sera dû uniquement au passage du courant. Cette configuration peut mener à un **collage statique** si les matériaux entrent en fusion pendant l'essai. Il peut également se produire un phénomène de « brûlage » qui peut être observé au début des courbes de coupure comme l'illustre la Figure 1.33. Avant l'ouverture des électrodes, la tension du produit U_{MCB} fait un saut bref, de l'ordre du dixième de millisecondes. Cette brève augmentation de tension est due à la perte de contact des électrodes avec l'apparition d'un arc de rebond. C'est le cas lors d'une rupture du pont fondu ou lors d'un mouvement relatif des électrodes : soit une rotation ou un glissement dus aux jeux mécaniques présents dans le produit de protection, soit une ouverture par répulsion si la force de contact imposée par la serrure n'est pas suffisante. Nous serons ici face à un phénomène de **collage dynamique** du fait de la présence de l'arc de rebond. La force de collage de ces soudures est souvent assez faible pour qu'elles soient cassées mécaniquement par l'ouverture des électrodes de contact. Ces brûlages sont donc nommés « tentatives de collage » ou « TC ».

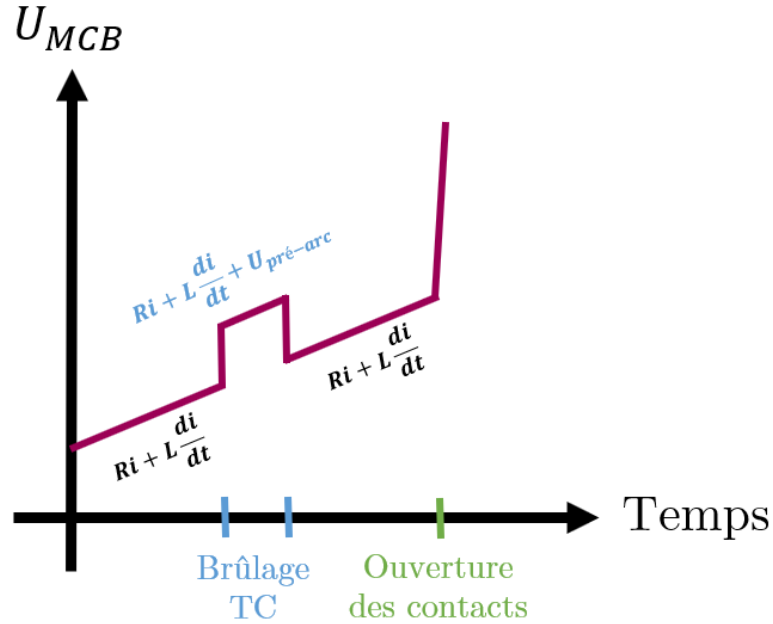


FIGURE 1.33 – Représentation temporelle de la tension aux bornes du produit au début de l'opération de coupure pour un essai « O ».

Lors des essais de type « CO », l'étude des phénomènes causant l'échauffement est plus compliquée car au début du passage du courant dans le contact, la force de contact varie entre la FIC et la F_c établie comme nous l'avons vu sur la Figure 1.13, avec même un possible rebond mécanique si la vitesse d'impact est trop élevée. Le **collage** peut alors être **statique** (sans rebond) ou **dynamique** (présence d'un arc dû au rebond).

La Figure 1.32 illustre la variété des configurations pouvant mener au collage des électrodes de contact. Pour démarrer ce travail de thèse sur le collage, nous avons d'abord décidé de nous intéresser au collage statique dans le cadre d'essais « O ». Ce choix a été fait pour étudier le phénomène d'échauffement et de collage dans une configuration d'essais la plus appréhendable possible, c'est-à-dire avec une force de contact établie avant l'apparition du courant de défaut et sans perte de contact pendant l'essai. Le but de cette première partie sera de trouver un moyen de mesurer expérimentalement la température des surfaces en contact pour pouvoir observer quels sont les paramètres expérimentaux limites pour éviter la fusion des matériaux de contact, et donc éviter les potentiels collages. Cette mesure de température pourra avoir une application concrète lors d'essais « O » ou « CO » avant l'ouverture du contact par la serrure. Nous pourrions en effet détecter la présence d'un collage potentiel, et en définir le type (statique ou dynamique) en fonction de la courbe de température mesurée. Cela permettra d'en déduire des actions à mener pour palier le phénomène observé, par exemple augmenter la force de contact imposée par la serrure.

Une fois cet outil de mesure validé, nous l'utiliserons lors de l'étude du collage dynamique en se plaçant dans le cas d'un arc généré par le rebond lors de la fermeture brusque d'un disjoncteur. Nous compléterons alors la mesure de température par une mesure de la

variation temporelle de la force de contact pendant l'essai, ainsi que par des diagnostics optiques pour détecter la présence de l'arc de rebond et sa composition.

1.4 Conclusion

Le réseau électrique BT qui alimente nos installations domestiques est une puissante source d'énergie qui peut délivrer en permanence une intensité de plusieurs kiloampères. Lorsqu'un défaut électrique apparaît, l'intensité de courant qui traverse l'installation augmente, avec une surcharge qui peut être lente avec une surintensité de l'ordre de 10 %, ou rapide lors d'un court-circuit avec des intensités pouvant dépasser les kiloampères. Ces surintensités occasionnent des échauffements dans les câbles et les éléments présents dans l'installation, avec de possibles incendies ou explosions. Il est ainsi crucial pour la sécurité des biens et des personnes de pouvoir détecter, limiter et couper ce courant de défaut. C'est le rôle des produits de protection comme le disjoncteur modulaire qui va être étudié dans ce travail de thèse.

Dans ce premier chapitre, nous avons d'abord défini le contexte de l'étude sur le contact électrique. La diversité des contacts dans le réseau électrique français assure à cette étude un fort intérêt et un grand champ d'applications. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au contact de coupure présent dans le système d'ouverture de la chambre de coupure du disjoncteur modulaire. Après avoir revu les rôles du disjoncteur ainsi que le principe de la coupure du courant, nous avons vu d'une manière globale les fonctions et le cahier des charges de ce contact pour les deux types d'essais de court-circuit auxquels sont soumis les disjoncteurs pour être validés normativement.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée au phénomène d'échauffement du contact du système d'ouverture. Nous avons décrit le lien qui existe entre la résistance de contact et les échauffements à travers les pertes Joules. Nous avons ensuite étudié les différents paramètres physiques qui influent sur cette résistance de contact avec principalement la surface de contact réelle où passent les lignes de courant, et l'impact de la force de contact sur la résistance de contact.

Dans la dernière partie de ce premier chapitre, nous avons détaillé la problématique de collage qui est le sujet de ce travail de thèse. L'origine et les deux types de collages ont été présentés. Lors d'un collage, c'est le dépassement de la température de fusion des matériaux qui induit un potentiel collage. Il peut être statique lorsque l'échauffement provient uniquement de la constriction des lignes de courant, ou dynamique lorsque c'est la chaleur apportée par la présence d'un arc de rebond qui occasionne la fusion des matériaux de contact. Ce collage potentiel devient problématique lorsque la force d'ouverture du contact via le mécanisme de la serrure ne parvient pas à casser la soudure en place. La soudure est alors qualifiée de collage. Des matériaux de contact composites sont utilisés dans les produits de protection pour éviter le phénomène de collage, mais leur choix d'utilisation est toujours le résultat d'un compromis entre leurs performances

mécaniques, thermiques, électriques mais également leur coût. Un matériau comme l'*AgC* qui est par exemple utilisé dans le disjoncteur étudié est plus résistant au collage que l'*Ag* pur, mais son taux d'érosion en présence d'un arc va être plus important. Nous avons également défini la relation théorique de la force de collage qui permet de quantifier l'intensité d'un collage. Plusieurs auteurs ont validé expérimentalement cette relation pour différents matériaux. Pour clore ce chapitre, l'approche de l'étude sur la problématique de collage a été détaillée. Nous étudierons d'abord le collage statique qui est plus appréhendable afin de mettre en œuvre un système de mesure de la température du contact. La détermination de cette température est indispensable à la définition du type de collage présent et à la recherche et à la mise en place d'une solution pour supprimer ce collage. Forts de ce système de mesure, nous étudierons ensuite le collage dynamique au travers de l'arc présent lors du rebond à la fermeture brusque du produit sur un défaut, lors d'un essai « CO ».

Chapitre 2

État de l'art sur le collage

Comme nous l'avons vu dans le précédent chapitre, la fusion des matériaux de contact peut mener à des phénomènes de collage dont l'intensité de la soudure est quantifiée par la force de collage. Si la force d'ouverture des électrodes de contact est insuffisante pour rompre cette force de collage, le produit de protection ne pourra pas couper le courant de défaut, ce qui entraînera des risques de sécurité pour les biens et les personnes. L'importance de la problématique de collage en fait ainsi un sujet d'étude fréquent dans la littérature, notamment par des auteurs travaillant dans le domaine industriel des contacts. Ce chapitre fait une synthèse des éléments bibliographiques existants sur le thème du collage.

Nous débuterons ce chapitre bibliographique en s'intéressant d'abord au phénomène de collage statique. Nous étudierons en premier lieu la solution utilisée expérimentalement pour la mesure de la température de contact. Elle réside en une mesure indirecte à partir de la tension de contact en utilisant la formule de Kohlrausch. Nous présenterons les validations expérimentales de cette formule extraites de la littérature, puis les cas où la validité d'application de cette formule est à vérifier. Les caractéristiques UI des contacts seront ensuite détaillées. Elles permettent de visualiser les différentes phases du comportement du contact face à l'échauffement, et de suivre également l'évolution de la température du contact pendant l'essai si l'application de la formule de Kohlrausch est possible. Nous nous focaliserons ensuite sur le courant limite de fusion qui traduit la capacité d'un contact à résister à la fusion, donc au collage, et nous détaillerons les phénomènes physiques se produisant durant la phase de fusion du contact jusqu'à l'apparition de l'arc électrique si la tension de volatilisation des matériaux est atteinte. Nous terminerons cet état de l'art sur le collage statique en présentant la formule théorique de force de collage statique maximum que peut développer un contact. Cette information est très utile en ce qui concerne le dimensionnement du mécanisme d'ouverture du contact.

La deuxième partie de ce chapitre traitera des connaissances bibliographiques actuelles sur le phénomène de collage dynamique. Nous détaillerons plus précisément les résultats obtenus dans le cas d'une soudure à la fermeture avec rebond car c'est cette configuration que nous chercherons à reproduire avec le gabarit « contact électrique dynamique ».

Nous passerons en revue l'impact que peuvent avoir les paramètres expérimentaux sur la force de collage dynamique avec notamment l'influence de l'énergie apportée par l'arc de rebond. Nous préciserons ensuite la différence qui existe entre surface de contact collée et surface de contact fondue et nous interpréterons cette différence quant à la force de collage résultante. Nous clôturerons cette partie en s'intéressant aux éléments bibliographiques attestant de la bonne résistance au collage dynamique du matériau composite *AgC* déjà évoquée précédemment.

2.1 État de l'art sur le collage statique

2.1.1 Solution pour la mesure de température du contact

La condition à l'origine du phénomène de collage est le dépassement de la température de fusion des matériaux de contact. Nous avons donc besoin de déterminer cette température de surface. Cela nous permettra de répondre à la question « Comment éviter le phénomène de collage ? » en connaissant les paramètres expérimentaux limites menant au collage et en situant l'état du contact électrique par rapport à ces limites. Cependant une mesure de température directe de la surface de contact est très délicate au vu de la taille de la surface à mesurer, assimilable à une surface circulaire de rayon de la dizaine à la centaine de micromètres, et des faibles rayons de courbures des électrodes en contact. Les travaux présentés dans la thèse de Landfried [32] décrivent par exemple une solution pour la mesure de température de surface à un instant donné par caméra thermique infrarouge (IR) dans le cas d'un arc entre deux électrodes. L'intensité lumineuse de l'arc rendant impossible l'analyse thermique, les auteurs ont donc fait le choix d'éteindre l'arc en moins de 1 μ s et d'acquérir une image IR dans un délai très court d'environ 40 μ s après extinction de l'arc. Cette solution, bien que complexe à mettre en œuvre d'un point de vue expérimental à cause des délais d'extinction et de capture d'image extrêmement courts, est envisageable à condition de pouvoir obtenir rapidement une visée correcte vers une électrode pour la mesure IR. C'est le cas dans la thèse [32] puisque les électrodes sont ouvertes avec un arc que l'on peut éteindre très rapidement. Mais dans notre cas, la visée est impossible du fait des forts rayons de courbure des électrodes. Il faudrait pouvoir retirer dans un temps extrêmement court une des deux électrodes, ce qui est impossible. De plus, cette méthode ne permet la mesure de température qu'à un instant donné, ici à la fin de l'arc émettant de la chaleur. Or pour notre étude, nous avons besoin de mesurer l'évolution temporelle de la température du contact électrique pour déterminer où nous nous situons par rapport à la température de fusion.

Pour pallier cette impossibilité de mesure directe, nous avons décidé d'utiliser une formule très connue dans la bibliographie de l'échauffement du contact électrique : la formule de Kohlrausch. Elle relie la température de la surface de contact à la tension aux bornes du contact électrique. Cette mesure indirecte de température via la tension de contact a l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre. Nous allons voir dans la suite de cette section la synthèse de la démonstration ainsi que les hypothèses d'application de la formule de Kohlrausch. Puis nous présenterons des validations expérimentales de cette

formule lorsque les conditions d'application sont réunies. Nous terminerons cette section par l'exposé des limites d'application de la formule et nous vérifierons si les paramètres expérimentaux de ce travail satisfont les hypothèses d'application de la formule.

La formule de Kohlrausch

La formule de Kohlrausch, du nom du physicien du XIXème siècle qui l'a démontrée en 1900 dans son article [33] est aujourd'hui encore couramment utilisée dans les travaux concernant les échauffements des contacts électriques. Cette démonstration a été reprise par Holm, Slade et Féchant dans leurs ouvrages respectifs [2][9][12]. Nous allons ici en faire une synthèse.

Dans un milieu conducteur homogène, les champs thermiques et électriques dérivent tous les deux d'une différence de potentiel (ddp). Les équations de diffusion de la chaleur et les équations électriques ont donc la même forme. Dans notre cas, les coefficients de transport des matériaux de contact sont isotropes, les réseaux équipotentiels – lignes de courant sont donc similaires aux réseaux isothermes – lignes de flux thermiques. Si nous prenons l'élément du tube de courant parcouru par dI et représenté à la Figure 2.1, nous pouvons en faire le bilan équilibré des puissances thermiques et électriques.

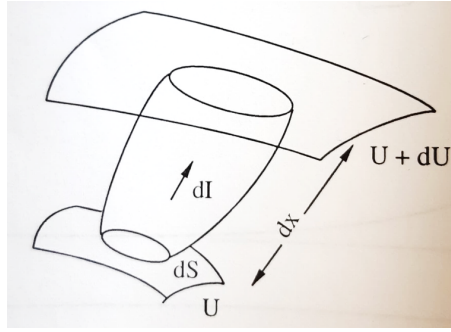


FIGURE 2.1 – Représentation d'un tube de courant traversé par un courant dI , entre deux surfaces aux potentiels U et $U + dU$ et séparées par une distance dx

Dans le volume du tube, la puissance électrique générée ($dI \cdot dU$) est égale à la différence de flux thermique à l'entrée et à la sortie de ce tube selon l'équation :

$$dI \cdot dU = d\left(-\lambda \frac{dT}{dx} dS\right)$$

et

$$dI \cdot U = \lambda \frac{dT}{dx} dS$$

avec

$$dI = \frac{dU}{dR} = \frac{dU \cdot dS}{\rho dx}$$

d'où

$$U \cdot dU = \rho \lambda dT$$

et

$$\int_{T_0}^{T_m} \rho \lambda dT = \frac{U^2}{2} \quad (2.1)$$

Avec T_m et T_0 les isothermes en K représentées sur la Figure 2.2, ρ la résistivité électrique du matériau en $\Omega.m$ et λ la conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

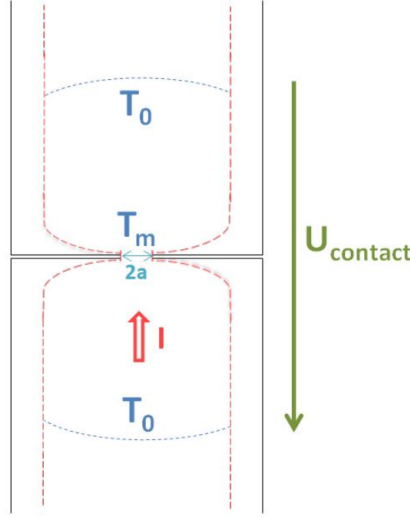


FIGURE 2.2 – Représentation schématique d'un contact de rayon a entre deux conducteurs cylindriques semi-infinis traversés par un courant I . Les températures T_0 et T_m représentent respectivement les isothermes assez loin du contact pour ne pas être affectées thermiquement par le contact, elles sont typiquement à température ambiante, et l'isotherme ayant la température la plus élevée.

Prenons maintenant le cas d'un contact symétrique illustré sur la Figure 2.2. La tension U présente dans la formule (2.1) est en fait égale à la moitié de la tension $U_{contact}$ aux bornes du contact de telle sorte que :

$$\int_{T_0}^{T_m} \rho \lambda dT = \frac{U_{contact}^2}{8} \quad (2.2)$$

Dans les conducteurs métalliques, les conductivités électrique et thermique sont régies par la circulation des électrons. La loi de Wiedeman-Franz traduit cette relation étroite grâce à l'équation :

$$\lambda \rho = LT \quad (2.3)$$

Avec L la constante de Lorenz en $V^2.K^{-2}$. Elle est indépendante de la température et ne varie que très peu d'un métal de contact à l'autre. Sa valeur théorique est $2.45 \cdot 10^{-8} V^2.K^{-2}$.

En combinant les équations (2.2) et (2.3), nous obtenons les équations :

$$\int_{T_0}^{T_m} LT dT = \frac{U_{contact}^2}{8}$$

$$\frac{1}{2}L[T^2]_{T_0}^{T_m} = \frac{U_{contact}^2}{8}$$

$$L(T_m^2 - T_0^2) = \frac{U_{contact}^2}{4}$$

D'où la formule de Kohlrausch couramment utilisée :

$$U_{contact} = \sqrt{4L} \sqrt{(T_m^2 - T_0^2)} \quad (2.4)$$

Les hypothèses d'application de cette formule sont précisées dans les ouvrages [9][12] :

- Le contact est purement métallique, c'est-à-dire propre, sans influence d'une couche d'oxyde ou de contamination externe.
- Les pertes de puissance de la constriction sont éliminées uniquement par conduction thermique, la convection et le rayonnement étant négligés.
- Les lignes de courant et de flux thermiques sont semblables, ce qui implique un régime quasi-statique des grandeurs électriques et thermiques.
- Les mesures de potentiels électriques et de température T_0 doivent se faire à des points à faible gradient de tension et de température, dans des zones assez éloignées du contact électrique.

Validation expérimentale de la formule de Kohlrausch

La formule (2.4) indique que pour une température ambiante T_0 donnée, la tension de contact $U_{contact}$ ne dépend que de la température T_m de la surface de contact, indépendamment du métal et de la géométrie du contact. Pour valider expérimentalement cette formule, différents auteurs ont mesuré les tensions de contact caractéristiques de plusieurs matériaux à leurs températures caractéristiques : les températures de ramollissement, de fusion et de volatilisation [11][12][18]. La Figure 2.3 illustre par exemple les mesures expérimentales présentées dans le document [18]. Nous pouvons y voir pour différents métaux et alliages les tensions de ramollissement (carrés), de fusion (ronds) et de volatilisation (triangles) en fonction des températures caractéristiques correspondants à ces modifications des matériaux. La ligne noire représente la formule de Kohlrausch (2.4) avec comme valeur de L sa valeur théorique $2.45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2 \cdot \text{K}^{-2}$ et $T_0 = 300 \text{ K}$. Les tensions mesurées sont globalement en très bon accord avec la formule de Kohlrausch notamment pour les tension de fusion et de volatilisation de l'argent et du cuivre qui sont les deux matériaux majoritairement présents dans les électrodes de contact testés dans ce travail de thèse.

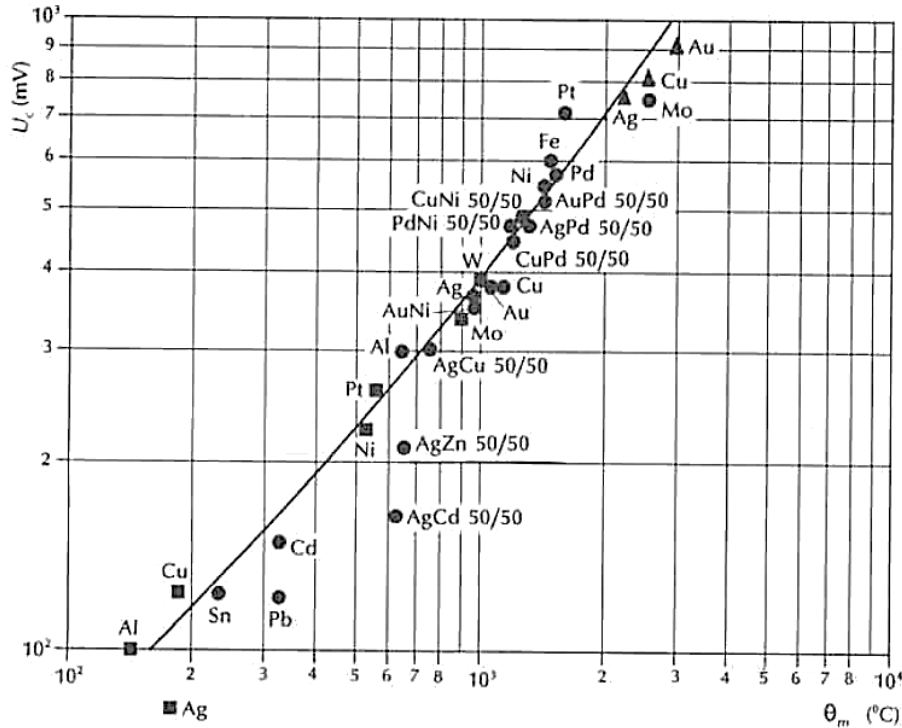


FIGURE 2.3 – Tensions de contacts mesurées pour différents matériaux à leurs températures caractéristiques de ramollissement (carrés), fusion (ronds) et volatilisation (triangles). La formule de Kohlrausch est représentée par la ligne noire avec $L = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2 \cdot \text{K}^{-2}$ et $T_0 = 300 \text{ K}$ [18].

Limites de validité de la formule de Kohlrausch

Pour utiliser la formule de Kohlrausch à partir de résultats expérimentaux, il faut vérifier que la configuration de test corresponde bien aux hypothèses de validité de la formule. Dans son article [34], Sano a étudié les limites d'application de la formule pour deux hypothèses qui sont dépendantes l'une de l'autre : les pertes de puissance sont éliminées uniquement par conduction, et les lignes de courant et de flux thermiques sont semblables. S'il y a un phénomène de convection avec un transfert de chaleur dans l'atmosphère par les faces des conducteurs, la formule peut ne plus être valide à cause d'un décalage qui se crée entre les distributions de potentiel électrique et de température. Dans cet article, une analyse numérique par éléments finis présente les écarts entre la température théorique via la formule de Kohlrausch et la température réelle de contact en cuivre obtenue par calcul numérique, pour une tension de contact égale à 200 mV . Elle se base sur le modèle de contact de la Figure 2.4 avec un transfert de chaleur également possible vers le milieu environnant noté « surroundings » sur la figure. La température réelle du contact est d'autant plus faible par rapport à sa valeur théorique selon Kohlrausch que :

- le coefficient de transfert λ du milieu environnant est élevé car l'évacuation de chaleur peut se faire de plus en plus par convection en plus de la conduction déjà existante dans les conditions d'application de la formule de Kohlrausch.
- le rayon de contact b est grand car il y aura des pertes supplémentaires par convection sur les bords des électrodes de contact.

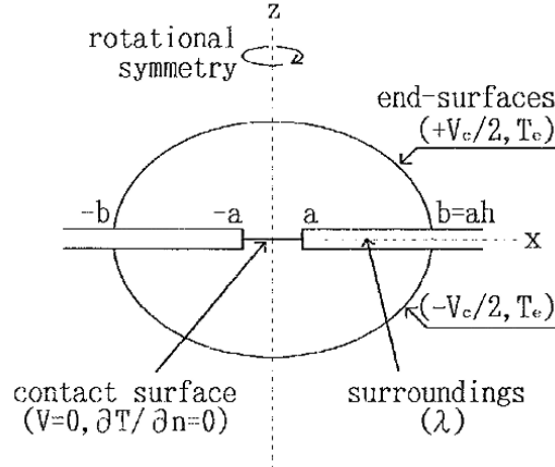


FIGURE 2.4 – Modèle du contact électrique utilisé pour l'analyse numérique dans l'article [34]. a est le rayon de la surface de contact en m, b le rayon des deux surfaces hémisphériques en m, h la taille relative du contact sans unité, λ le coefficient de transfert thermique du milieu environnant en $W.m^{-2}.K^{-1}$

Sano propose finalement un coefficient de correction à appliquer à la formule de Kohlrausch et qui est fonction des paramètres expérimentaux h et du nombre de Biot $\lambda b/\kappa$, κ étant la conductivité thermique du matériau de contact en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Pour appliquer la formule de Kohlrausch, nous nous sommes également demandé si nos conditions expérimentales satisfaisaient l'hypothèse d'un régime quasi-statique des grandeurs électriques et thermiques. En effet lors de nos essais, nous faisons passer dans le contact une onde de courant AC de fréquence proche de 50 Hz dans sa phase ascendante. Cette fréquence est choisie pour reproduire au mieux l'onde de courant de court-circuit imposée par le réseau électrique européen. Si nos conditions expérimentales ne satisfont pas la condition de régime quasi-statique, c'est-à-dire si le courant varie trop vite, il pourra y avoir un décalage temporel entre la tension du contact et sa température. Le point de fusion des matériaux de contact pourra donc être atteint après que la tension de contact a atteint la tension de fusion des matériaux.

De plus dans la littérature, il n'y a que très peu d'informations sur la validité de la formule de Kohlrausch pour les ondes en AC. Dans la suite de nos travaux, il faudra ainsi vérifier la validité de cette formule pour notre onde de courant à 50 Hz, en précisant si besoin à quels instants elle est valable, ou bien par exemple décider de l'utiliser uniquement comme lien entre tension maximale et température de contact maximale, indépendamment du décalage temporel. Cette vérification se fera principalement via la simulation qui nous permettra de connaître à chaque instant de l'essai la tension et la température du contact.

2.1.2 Caractéristiques UI

La formule de Kohlrausch souligne la dépendance entre la température de la surface de contact et la tension aux bornes du contact. Comme nous l'avons vu dans la section

précédente, cette mesure de température est très délicate. Il est donc courant pour les scientifiques de ce domaine de mesurer la tension du contact en fonction du courant le traversant, pour avoir une image des échauffements dans le contact, et donc nous situer par rapport à une fusion synonyme de collage potentiel. C'est ce que nous appelons les caractéristiques UI . Il en existe deux types selon l'évolution de la taille de la surface de contact pendant l'essai :

- Lorsque le rayon équivalent de contact évolue pendant l'essai électrique, notamment à cause du ramollissement et de la fusion des matériaux de contact. Cette caractéristique UI est nommée « comportement 1 ».
- Lorsque le contact est soudé, le rayon de contact est significativement plus élevé que lors d'un contact purement mécanique sans passage de courant. Le rayon reste constant pendant toute la durée de la décharge électrique. Nous nommons cette caractéristique « comportement 2 ».

Dans cette partie nous ferons d'abord un état de l'art de la caractéristique UI « comportement 2 » sans évolution du rayon de contact avant de faire celui de la caractéristique UI « comportement 1 » avec évolution du rayon de contact. Ce choix est fait afin de faciliter la compréhension de l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu dans l'échauffement d'un contact électrique et pouvant être à l'origine d'un collage. Nous terminerons cette partie en détaillant la notion de courant limite de fusion et en précisant les phénomènes physiques mis en jeu lors de la fusion des matériaux.

Bibliographie de la caractéristique UI « comportement 2 »

Les caractéristiques UI « comportement 2 » sont mesurables pour un contact ayant déjà subi une fusion lors d'un essai préalable. La surface de contact est alors soudée avant le début de l'essai et le rayon a de cette surface soudée est bien plus élevé que le rayon de contact avant l'essai préalable ayant mené à la fusion. Pendant cet essai en « comportement 2 », le rayon a reste constant. Les courbes de la Figure 2.5 représentent des cycles UI en « comportement 2 », hormis la dernière courbe qui mène à la refusion du contact. Elle est extraite de l'ouvrage [12]. Pour obtenir un contact préalablement soudé, les électrodes de contact en argent ont été traversées par une demi-onde de courant sinusoïdale 50 Hz ayant mené à la fusion du contact électrique. Puis le contact est traversé par des ondes de courant d'intensités maximum croissantes, d'environ 2500 à 4200 A. Les caractéristiques UI correspondantes sont présentées sur la figure suivante.

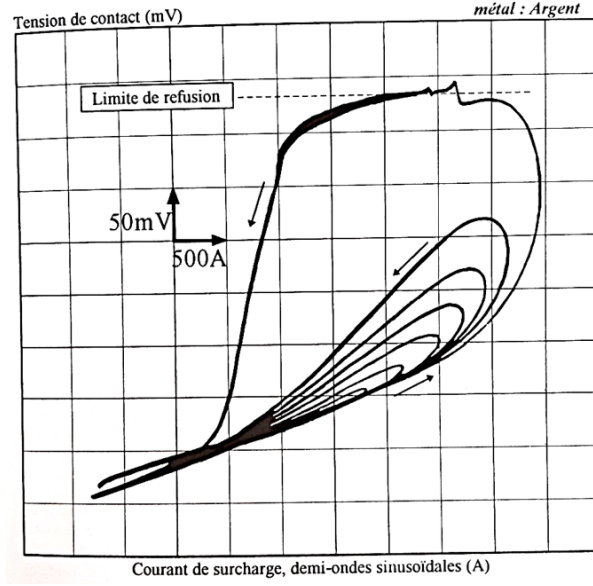


FIGURE 2.5 – Cycles UI obtenus lors du passage d'un courant d'intensité crête croissante dans un contact en argent soudé. L'onde de courant traversant le contact est une demi-onde sinusoïdale de fréquence 50 Hz. La refusion du contact est obtenue légèrement après le maximum de l'intensité du courant pour une onde d'intensité crête 4200 A [12].

Pour chaque début de cycle, la caractéristique UI est linéaire, ce qui implique une résistance de contact constante selon la loi d'Ohm $U_{contact} = R_{striction} \cdot I$. Lorsque l'intensité du courant dépasse environ 1500 A, les courbes s'infléchissent avec une pente, donc une résistance de contact qui augmente. Ce phénomène bien connu est lié à l'augmentation de la résistance de contact avec la température. Holm dans sa monographie [2] donne l'expression de la résistance de contact en fonction de la température maximale T_m de la surface de contact :

$$R_{striction}(T_m) \approx R_{striction}(T_0) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha (T_m - T_0) \right) \quad (2.5)$$

Avec $R_{striction}$ la résistance aux bornes du contact en Ω , α le coefficient de température du matériau de contact en K^{-1} et T_m et T_0 respectivement les températures maximale de la surface de contact et la température ambiante en K . Cette relation diffère de la relation classique pour un conducteur uniformément chauffé. En effet ici un coefficient $\frac{2}{3}$ est ajouté pour diminuer le coefficient de température α car la température n'est pas homogène sur toute la surface de contact de rayon a . La température moyenne de la surface de contact est ainsi plus faible que sa température maximale T_m .

Hormis la dernière courbe qui mène à une refusion du contact, tous les essais conservent une surface de contact constante et forment un cycle dont la pente (donc la résistance de contact) est régie par la température du contact selon l'équation (2.5). La largeur de ces cycles dépend de la valeur crête du courant injecté, du rayon de contact et des propriétés du matériau (résistivité électrique, coefficient de température et capacité thermique) [35]. Notons que pour les essais en « comportement 2 », le cycle se fait dans le sens anti-horaire à cause de l'inertie thermique du contact qui ralentit la baisse de température (donc de tension) lors de la phase descendante de l'onde de courant.

La dernière courbe est observée pour une onde de courant d'intensité crête élevée, d'environ 4200 A. Après l'intensité crête, il s'y passe une refusion du contact avec une augmentation de la surface de contact. Ce courant limite qui mène à une refusion du contact est significativement repoussé par rapport au courant limite de fusion lors d'un essai en « comportement 1 » sans collage préalable que nous verrons dans la partie suivante. Il dépend de la taille de la surface soudée ainsi que du temps d'apparition de l'intensité crête [12]. Pour prendre un exemple qui se rapproche des conditions expérimentales de ce travail de thèse, pour un contact en argent soudé de rayon $a = 250 \mu m$, avec une onde de courant atteignant son intensité maximum en 5 ms (50 Hz), la refusion sera atteinte pour une onde d'intensité crête 4600 A environ. Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous injecterons des ondes de courant de 2800 A maximum. Les courbes de « comportement 2 » que nous visualiserons seront donc du même type que les six premiers cycles de la Figure 2.5, sans évolution de la surface de contact.

Bibliographie de la caractéristique UI « comportement 1 »

Passons maintenant à la caractéristique UI en « comportement 1 ». C'est au cours de cette configuration que peut apparaître un collage si la température de fusion des matériaux de contact est atteinte. Comme nous allons le détailler dans cette section, il sera question d'un collage statique dans les conditions expérimentales de cette thèse, et non d'un collage dynamique qui sera l'objet d'une prochaine section.

L'allure de cette caractéristique UI a été décrite en théorie, mais aussi vérifiée expérimentalement par un grand nombre d'auteurs [5][11][12][18][35][36]. Ces publications diffèrent du fait du couple de matériaux utilisé, de la forme et de l'intensité crête de l'onde de courant injectée dans le contact et de la force de contact appliquée. Une majorité de ces auteurs utilisent néanmoins une demi-onde de courant sinusoïdale de fréquence 50 Hz pour simuler un défaut électrique alimenté par le réseau électrique européen.

La Figure 2.6 représente schématiquement l'allure de la caractéristique UI pour le « comportement 1 ». Chaque zone de la caractéristique est numérotée sur le graphique et correspond à différents états d'échauffement du contact électrique lorsqu'il est parcouru par une onde de courant [12].

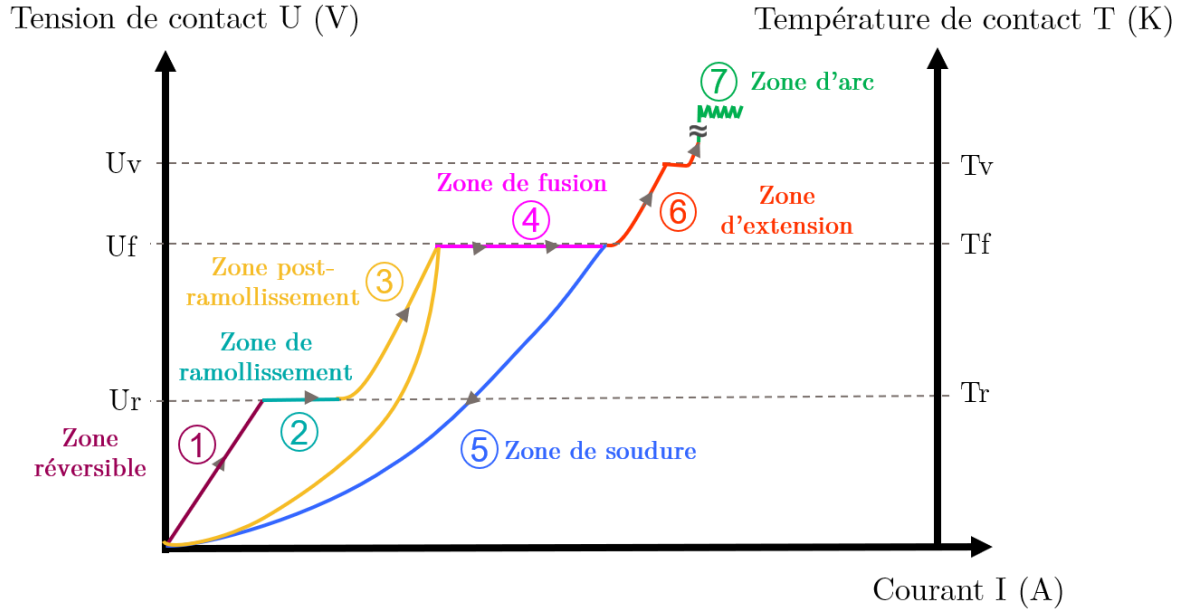


FIGURE 2.6 – Représentation schématique de l'allure d'une caractéristique UI en « comportement 1 ». Les indices r , f et v des tensions et des températures de contact correspondent respectivement au ramollissement, à la fusion et à la volatilisation du contact

1. *Zone réversible* : la variation de la tension de contact U est linéaire avec l'augmentation de l'intensité du courant I selon la loi d'Ohm $U = R_0 I$ avec R_0 la résistance de striction du contact à température ambiante. Ici le rayon de la surface de contact est relativement faible et n'est pas modifié par l'échauffement du contact qui reste faible également, en dessous de T_r . Cette zone peut être parcourue lors d'essais successifs sans qu'il n'y ait de modification de la zone de contact, d'où sa dénomination de zone réversible. Pour un contact en argent cette zone s'étend de 0 à 100 mV, ce qui correspond à une température inférieure à 180 °C.
2. *Zone de ramollissement* : lorsque la température T atteint la température de ramollissement T_r des matériaux, la résistance de contact diminue rapidement et la tension U se stabilise. Ce changement de pente est causé par l'augmentation rapide du rayon de contact a , selon l'équation (1.10), car la dureté des matériaux baisse alors que la force de contact reste pratiquement inchangée. Cet écrasement est une adaptation du contact pour limiter son échauffement face à une intensité élevée.
3. *Zone de post-ramollissement* : la dureté des matériaux en contact continue de baisser mais le rayon de contact a n'augmente pas assez vite pour empêcher l'échauffement du contact. La tension U continue donc d'augmenter. Comme l'intensité I est de plus en plus élevée, les forces de répulsion électromagnétiques sont de plus en plus intenses (proportionnelles au carré de l'intensité). Elles ont pour conséquence de diminuer localement les rayons des spots de contact individuels qui vont s'échauffer jusqu'à créer des collages locaux par thermocompression.
4. *Zone de fusion* : lorsque la température du contact atteint la température T_f de fusion des matériaux, la tension U se stabilise brusquement en formant un plateau. Sur ce plateau, la température du contact reste stable à la température T_f . La zone

de contact est liquide et la rayon a s'adapte rapidement à l'augmentation de l'intensité I .

Une fois la zone de fusion atteinte, il peut y avoir plusieurs scénarios possibles en fonction de l'évolution de l'intensité du courant :

5. *Zone de soudure* : si l'intensité diminue pour revenir à zéro, la tension U baisse quasi-instantanément de même que la température T qui passe en dessous de la température de fusion des matériaux. Le contact se solidifie en gardant un rayon de contact a constant durant toute cette zone.
6. *Zone d'extension* : si le courant est toujours croissant, la force de contact n'arrive plus à compenser les forces de répulsion. Le pont fondu va alors s'étirer au fur et à mesure de l'augmentation de I . Le rayon de la constriction au centre du pont fondu étant de plus en plus faible, la tension de contact U va dépasser la tension de fusion U_f .
7. *Zone d'arc* : lorsque l'intensité I traversant le pont fondu est trop élevée, la température du milieu du pont fondu atteint la température T_v de volatilisation des métaux en fusion. Il y a alors rupture du pont fondu avec l'ionisation du milieu inter-électrodes et la création d'un arc électrique. La tension U est maintenant celle des arcs courts, typiquement de 10 à 16 V [12].

Dans cette thèse, nous utiliserons un courant se rapprochant d'une demi-onde sinusoïdale 50 Hz d'intensité crête croissante jusqu'à 2800 A. Nous observerons donc des cycles comprenant les zones 1 à 5, notre intensité de courant n'était pas assez élevée pour atteindre les zones 6 et 7, respectivement d'extension et d'arc. Nous serons donc bien dans le cas d'étude d'un collage statique, sans présence d'un arc, où la tension de contact maximum est celle de la zone de fusion.

Nos courbes expérimentales présentées au chapitre 4 seront comparées aux résultats publiés dans [5][11][12][36][35]. La Figure 2.7 présente l'exemple de caractéristiques UI obtenues par Féchant dans son livre [12] pour l'Ag et l'AgC. Ces courbes sont obtenues avec des ondes sinusoïdales de fréquence 10 Hz. Le choix de ces ondes d'assez longue durée (5 fois plus lentes que nos ondes à 50 Hz) est fait pour limiter les effets transitoires et se rapprocher le plus possible de la condition de régime quasi-statique imposée pour l'utilisation de la formule de Kohlrausch.

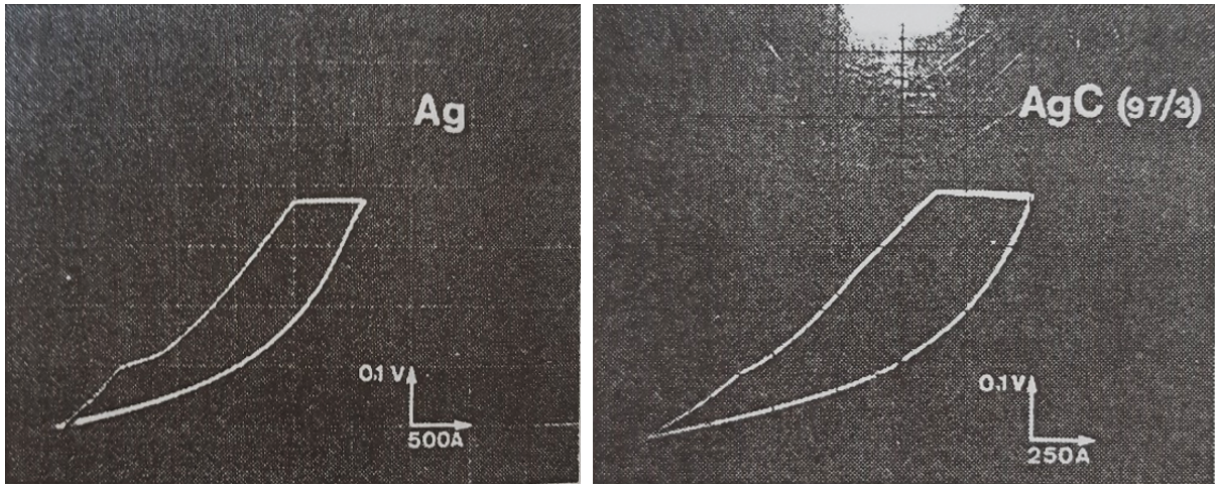


FIGURE 2.7 – Caractéristiques UI extraites du livre de Féchant [12] pour l'Ag et l'AgC. La fusion de l'Ag débute à environ 2000 A avec une tension de fusion stable à environ 370 mV. Pour l'AgC, la fusion débute à 1100 A avec une tension d'environ 380 mV.

Les travaux de thèse présentés dans [37] valident également expérimentalement les phénomènes décrits pour le cycle UI de la Figure 2.6 mais ici avec un vieillissement préalable de la surface de contact. Les électrodes en $AgSnO_2$ sont d'abord testées dans leur état initial avec une rampe de courant de 50 mA à 75 A puis de 75 A à 50 mA pour avoir une caractéristique UI de référence pour ce contact. Cette caractéristique linéaire est la courbe noire sur la Figure 2.8. Le contact est ensuite dégradé avec 200 opérations d'arc d'ouverture à 42 VDC et 37.5 A, ce qui diminue la surface réelle de contact où peut passer le courant. En effet les opérations d'arc d'ouverture peuvent augmenter la rugosité de surface des électrodes, modifier la dureté des matériaux et engendrer le dépôt de couches d'oxydes en surface. La courbe rouge représente le cycle UI typique d'un contact ainsi dégradé soumis à la même rampe de courant. La résistance de la zone réversible est augmentée d'un facteur 100 par rapport à l'état de référence du contact. La tension de contact atteint rapidement la tension de ramollissement du matériau de contact et la zone réversible laisse place à la zone de ramollissement avec une stagnation de la tension de contact jusqu'à l'intensité maximum de 75 A. Nous pouvons aussi faire l'hypothèse que le passage d'une zone à l'autre peut être facilité par la destruction thermique des films d'oxydes potentiellement présents sur la surface de contact. L'objectif de la thèse de Choi [37] étant l'étude des arcs et de leurs conséquences sur les matériaux de contact, le dispositif expérimental permettant ces mesures UI se concentre sur la résistance de contact pour des intensités de courant ne dépassant pas 75 A. La tension de contact n'atteint pas les zones suivantes mais diminue linéairement avec la baisse de l'intensité du courant. La résistance de contact est ici plus faible que dans la zone réversible de la courbe (1,40 $m\Omega$ Vs 48 $m\Omega$) grâce à l'augmentation de la surface réelle de contact via le ramollissement du matériau et la destruction d'un potentiel film d'oxyde en surface. Une dernière rampe de courant, toujours identique, est finalement injectée dans le contact sans qu'il n'y ait eu de séparation après la fin de l'essai de la courbe rouge. La courbe verte (vert clair pour la montée, et vert foncé pour la descente) illustre cette caractéristique UI linéaire qui est semblable à la descente de la courbe rouge. En effet nous sommes à nouveau dans une zone réversible, mais cette fois avec une surface de contact constante

qui a été définie par l'essai précédent.

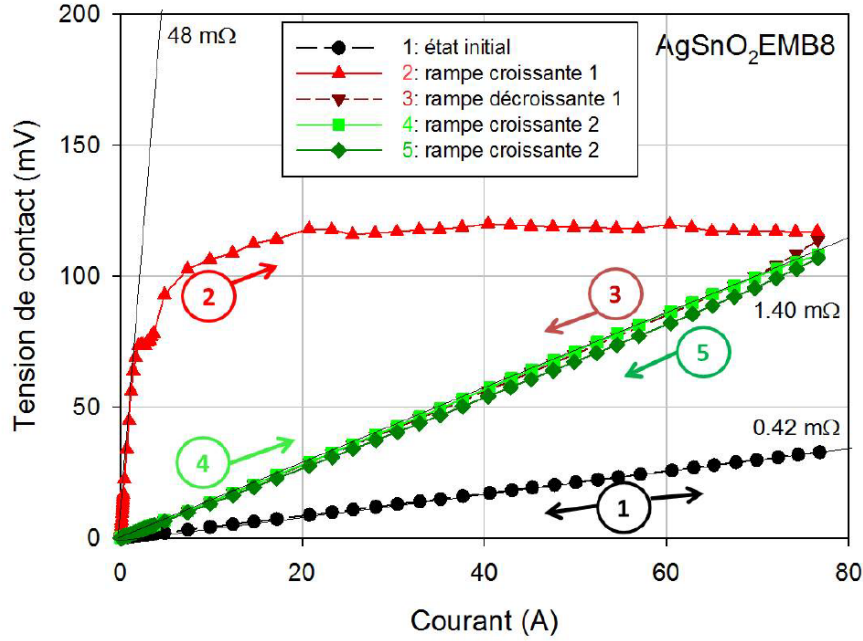


FIGURE 2.8 – Caractéristiques UI typiques pour un contact en $AgSnO_2$ avant et après dégradation du contact par arcs d'ouverture. La courbe noire est réalisée avant dégradation du contact et les courbes rouge et verte après dégradation par 200 opérations d'arc d'ouverture à 42 VDC et 37.5A. Il n'y a pas de séparation des électrodes de contact entre la courbe rouge et la verte [37]

Notion de courant limite de fusion

La notion de courant limite de fusion est assez répandue chez les auteurs qui traitent le sujet du collage statique [11][31][38][39][40][41]. Ce courant limite de fusion correspond à l'intensité de courant minimum à partir de laquelle le contact fond, au passage de la zone 3 à la zone 4. C'est donc un paramètre important car il représente la capacité d'un contact à résister à une surcharge de courant sans fondre, et donc sans qu'il y ait un risque de collage statique.

Pour donner une définition mathématique à ce courant limite de fusion, les auteurs se placent dans l'hypothèse d'un passage de courant en régime établi, où les changements de température dans les matériaux se déroulent en parallèle de l'évolution du courant dans le circuit. Les formules de Holm (1.10) et de Kohlrausch (2.4) peuvent donc être appliquées dans leurs raisonnements.

Le courant limite de fusion I_f peut être calculé à partir de la tension de fusion du contact U_f et la résistance de contact $R_{striction}$ selon la formule [31] :

$$I_f = \frac{U_f}{R_{striction}} \quad (2.6)$$

Pour arriver à l'expression finale de ce courant limite, nous utilisons plusieurs relations déjà détaillées précédemment dans ce manuscrit :

- La formule de Holm (1.10) : $R_{striction} = \frac{\rho}{2a}$
- La relation qui lie le rayon de contact à la force de contact et à la dureté des matériaux (1.4) : $a = \sqrt{\frac{F_{TOT}}{\xi\pi H}}$ en prenant $\xi = 1$ et $F_{TOT} = F_C - F_{répulsion}$
- La relation dérivée de l'augmentation de la résistance de contact, mais cette fois avec la résistivité du matériau de contact (2.5) :

$$\rho(T_1) \approx \rho_0(1 + \frac{2}{3}\alpha(T_1 - T_0))$$

T_1 correspond ici à une température très proche mais légèrement inférieure à la température de fusion. En effet au moment de la fusion, la résistivité des matériaux augmente brutalement, de l'ordre d'un facteur 10 pour l'Ag. La relation (2.5) et sa relation dérivée avec la résistivité ne pourraient donc plus être appliquées. Nous devons également utiliser cette température juste avant la fusion pour la valeur de dureté H . En effet, la dureté des matériaux chute avec la température et une fois que la fusion est atteinte, la notion de dureté n'a pas vraiment de sens. Pour l'argent et le cuivre, la dureté juste avant la fusion est approximée comme étant un dixième de sa valeur à la température ambiante. La valeur de H dans la formule est ainsi remplacée par le terme $0.1 H_0$. La définition mathématique du courant limite du fusion donnée par Holm [31] est ainsi :

$$I_f = \frac{2U_f \sqrt{F_c - F_{répulsion}}}{\rho_0(1 + \frac{2}{3}\alpha(T_1 - T_0))\sqrt{\pi(0.1H_0)}} \quad (2.7)$$

Les cinq publications citées au début de cette section sur le courant limite de fusion rapportent des valeurs expérimentales qui diffèrent étant donné le matériau de contact testé et la gamme de force de contact mécanique F_c utilisée. Seules les recherches présentées dans [39][40] portent sur l'étude d'un contact en argent sur une gamme de forces de contact englobant celle utilisée dans notre travail de thèse. La Figure 2.9 , extraite de [39], représente en ligne pleines les courants limites théoriques de ramollissement, de fusion et de volatilisation en fonction de la force de contact F_c d'un contact en argent. Les valeurs expérimentales obtenues pour la limite de fusion sont symbolisées par des ronds sur le graphique et sont en bon accord avec la ligne théorique associée à l'équation (2.7).

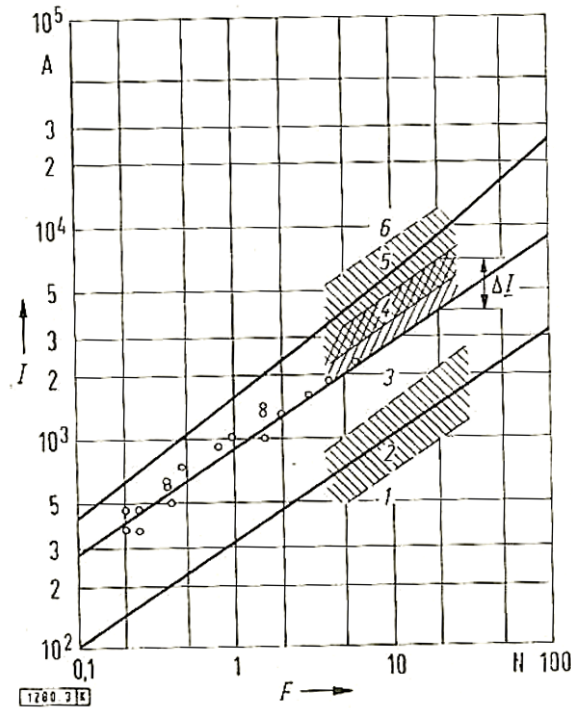


FIGURE 2.9 – Graphique représentant en lignes pleines de bas en haut, respectivement les courants limite théoriques de ramollissement, de fusion et de volatilisation en fonction de la force de contact mécanique F_c imposée à un contact en argent. Les valeurs expérimentales mesurées pour la fusion sont symbolisées par des ronds [39].

Si nous nous fions à cette ligne du courant limite de fusion théorique, nous obtenons les valeurs suivantes pour les forces de contact mécaniques utilisées dans ce travail de thèse. Ces valeurs de courant seront comparées à nos résultats dans la suite du manuscrit.

Force de contact F_c (N)	Courant limite de fusion théorique (A)
3	1500
6	2000
12	3000

TABLE 2.1 – Courant limite de fusion théorique en fonction de la force de contact F_c pour un contact en argent selon [39].

Phénomènes physiques mis en jeu lors de la fusion du contact jusqu'à son départ en arc

Lorsque le contact électrique arrive en phase liquide dans la zone de fusion (zone 4), le rayon de contact a n'est plus dépendant de la force de contact totale comme il l'était avant le début de la fusion. La force de contact imposée F_c a ici uniquement pour but de compenser les forces de répulsion électromagnétiques [42]. Durant cette phase où sa température reste globalement stable, le contact s'adapte à l'intensité le traversant en faisant évoluer son rayon fondu a_f proportionnellement à l'intensité du courant de fusion I_f . Le rapport I_f/a_f est donc constant et est défini théoriquement dans le cas d'un modèle

ellipsoïdal par la relation (2.8) [12][25] :

$$\frac{I_f}{a_f} = \frac{4\lambda_0}{\sqrt{L}} \arccos\left(\frac{T_0}{T_f}\right) \quad (2.8)$$

Avec T_f la température de fusion des matériaux en contact en K . Les autres grandeurs ont été précisées précédemment.

Différents auteurs ont validé expérimentalement cette relation [25][40][43]. Leurs valeurs expérimentales seront détaillées dans le chapitre 4 dédié à la présentation des résultats.

Durant la fusion, même si la température, et donc la tension du contact restent globalement stables, il existe en réalité des oscillations de tension visibles sur la Figure 2.10 jusqu'à environ 9 μs dans les conditions spécifiques à l'expérience réalisée par Féchant et Tixador [25]. Ces oscillations sont décrites dans [11][44][45] et correspondent à la formation et à la resolidification successives du pont fondu. En effet lorsque la température est telle que la fusion des matériaux est atteinte, le rayon de la striction augmente brutalement ce qui diminue la résistance de constriction du contact. La réduction de l'effet Joule entraîne une diminution de la température du contact fondu qui se resolidifie. Puis comme le courant injecté dans le contact est de plus en plus intense, la densité de courant augmente et la température dépasse à nouveau la température de fusion des matériaux. Cette fusion entraîne une augmentation de la surface de contact, ce qui diminue la résistance et la température de contact, etc.

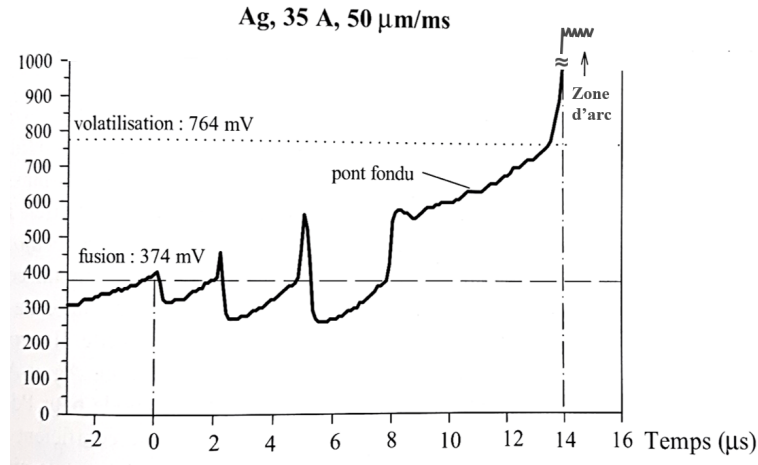


FIGURE 2.10 – Evolution temporelle de la tension aux bornes d'un contact en Ag, de la zone de fusion jusqu'au début de la zone d'arc [25].

Cet état de fusion de la zone 4 est présent tant que la force de contact imposée permet de compenser les forces de répulsion électromagnétiques. Lorsque ce n'est plus le cas, le contact entre dans la zone d'extension de son pont fondu (zone 6), visible entre 9 et 14 μs sur la Figure 2.10. Cette extension par répulsion des électrodes a pour conséquence de réduire progressivement le diamètre du pont fondu. La densité de courant

y est donc de plus en plus importante, d'autant plus que l'intensité de courant injectée augmente dans le même temps. Il en résulte une augmentation de la température au-delà de la température de fusion, et donc aussi une augmentation de la tension aux bornes des électrodes [45]. La relation (2.8) entre I_f et a_f n'est plus valable dans cette zone à cause de la création du pont fondu entre les électrodes. Le rapport I_f/a_f augmente [42].

Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité du courant, les forces des répulsions tirent de plus en plus sur le pont fondu. Sa température croît jusqu'à atteindre la température de volatilisation du matériau, à partir de $14 \mu s$ sur la Figure 2.10. Le pont explose en laissant place à un arc électrique. C'est la zone d'arc (zone 7) qui est caractérisée par l'augmentation significative de la tension aux bornes des électrodes, avec un bond de quelques centaines de mV selon [46] à des tensions de l'ordre de la dizaine de volts selon [45].

2.1.3 Force de collage statique

La connaissance de la force de collage est importante pour concevoir au mieux un système d'ouverture du contact capable de briser la soudure. Pour cela, Slade propose dans son ouvrage [9] la relation (2.9) qui définit la force de collage maximum qui peut se produire en fonction de l'énergie électrique injectée dans le contact. La démonstration de cette relation est basée sur plusieurs hypothèses :

- La fusion apparaît lorsque la température des surfaces en contact atteint la température de fusion des matériaux.
- Le volume de matière en fusion dans la zone de contact est sphérique.
- Toute l'énergie apportée par le courant de fusion est utilisée pour chauffer de manière adiabatique le volume sphérique en fusion.

$$(F_{\text{collage stat}})_{\text{max}} = K \cdot W_c^{\frac{2}{3}} \quad (2.9)$$

Avec $(F_{\text{collage stat}})_{\text{max}}$ le maximum possible pour la force de collage statique en N, K un coefficient théorique propre à chaque matériau, et $W_c = \int U_{\text{contact}} Idt$ l'énergie électrique utilisée pour faire fondre le contact en J .

Le coefficient théorique K est défini en fonction des paramètres du matériau de contact selon l'équation (2.10) ci-dessous. Ses valeurs théoriques sont de 67 pour l'Ag et de 127 pour le Cu. Pour une même énergie W_c apportée à la surface de contact, des électrodes en cuivre pourrons ainsi coller avec une force de contact plus élevée que des électrodes en argent.

$$K = \sigma \pi \left(\frac{3}{4\pi \delta [C_V(T_f - T_0) + C_L]} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.10)$$

Avec σ la résistance à la traction du matériau en $N.m^{-2}$, δ la densité du matériau, C_V et C_L respectivement les chaleurs spécifique en $J.K^{-1}.kg^{-1}$ et latente de fusion en

$J.kg^{-1}$ et T_f et T_0 les températures de fusion et ambiante en K .

L'expression (2.9) repose sur l'hypothèse d'un chauffage adiabatique où toute l'énergie électrique est utilisée pour faire chauffer le contact. Or en réalité il y a des pertes de chaleur, principalement par conduction vers le reste des électrodes. La valeur de force de collage donnée par cette expression est donc bien la valeur maximum pouvant être atteinte théoriquement. Elle reste cependant utile pour le dimensionnement de la force nécessaire pour l'ouverture du contact par le système mécanique de la serrure.

2.2 État de l'art sur le collage dynamique

Le phénomène de collage dynamique, qui se caractérise par la présence d'un arc, peut être le résultat de plusieurs modes de soudures :

- La fermeture avec amorçage préalable : l'arc se forme par claquage diélectrique avant la fermeture mécanique des contacts.
- La fermeture avec rebond : l'arc est présent lors du rebond mécanique du contact lorsque la vitesse de fermeture des électrodes est trop importante.
- L'auto-ouverture par répulsion : lorsque l'intensité du courant traversant le contact fermé est trop élevée, les forces de répulsion, proportionnelles au carré du courant, ne sont plus compensées par la force de fermeture du contact. Le contact s'ouvre en formant un arc entre ses deux électrodes.

Dans cette partie qui traite des connaissances actuelles sur le phénomène de collage dynamique, nous nous intéresserons plus particulièrement au mode de soudure à la fermeture avec rebond car c'est cette configuration que nous cherchons à étudier expérimentalement grâce au gabarit « contact électrique dynamique ». Pour dissocier cet arc lié au rebond, nous appellerons cet arc « arc de rebond ».

Lors de l'apparition d'un arc électrique entre deux électrodes de contact, l'état de surface de ces électrodes va être modifié. Il s'en suit une érosion des matériaux, qui lorsqu'elle est significative, peut empêcher le bon fonctionnement du produit s'il y a perte de conduction électrique. Comme expliqué dans le chapitre 1, l'autre inconvénient majeur à la présence de l'arc de rebond est le risque de collage. Si la surface soudée n'est pas trop étendue, cela peut être un avantage puisque l'augmentation de la surface réelle de passage du courant diminue la résistance de contact et donc les échauffements. Mais si la force de déverrouillage de la serrure du produit n'est pas suffisante pour casser la soudure, le collage sera effectif et le système sera rendu non fonctionnel, avec les risques pour les biens et les personnes déjà évoqués précédemment.

La force de collage avec laquelle le contact est soudé dépend de plusieurs contraintes :

- La contrainte thermoélectrique qu'impose l'arc de rebond à la surface de contact. Elle est fonction de l'intensité et de la durée de l'arc de rebond.

- La contrainte mécanique causée par l'impact du contact mobile sur le contact fixe. Elle est caractérisée par certains paramètres cinétiques comme la masse des électrodes, la force de contact statique F_c imposée par le ressort et la vitesse d'impact, et dépend également des paramètres mécaniques des matériaux de contact.

Il est compliqué de comparer les résultats expérimentaux de la littérature en matière de force de collage et de surface soudée car les matériaux et les configurations de tests varient d'un auteur à l'autre : usure des matériaux, intensité de l'arc avec une onde de courant en AC ou en DC, durée et hauteur du rebond, vitesse d'impact, force de contact statique F_c imposée par le ressort. Nous choisissons ainsi de présenter dans cette partie une synthèse des résultats expérimentaux dont les conditions expérimentales (matériaux ou configuration des tests) se rapprochent au mieux des conditions expérimentales présentées pour ce travail de thèse.

2.2.1 Influence du courant de l'arc pendant le rebond

En 2004, Neuhaus et al tentent de dégager plusieurs tendances bibliographiques à propos des paramètres influençant la force de collage [47]. Concernant le courant de l'arc pendant le rebond, il y a un large consensus dans la littérature qui décrit une augmentation de la force de collage avec l'augmentation de l'intensité de l'arc de rebond. Cette tendance est aussi confirmée par Neuhaus et al [47] pour un contact en argent pur et dans [45] pour différents alliages à base d'argent.

Slade publie également dans son livre [9] un graphique représenté à la Figure 2.11 qui confirme cette tendance pour plusieurs matériaux de contact. Pour un rebond de durée constante, la force de collage de chaque matériau testé augmente avec l'intensité de l'arc lors du rebond, avec un coefficient linéaire sauf pour l'Ag-CdO (90/10).

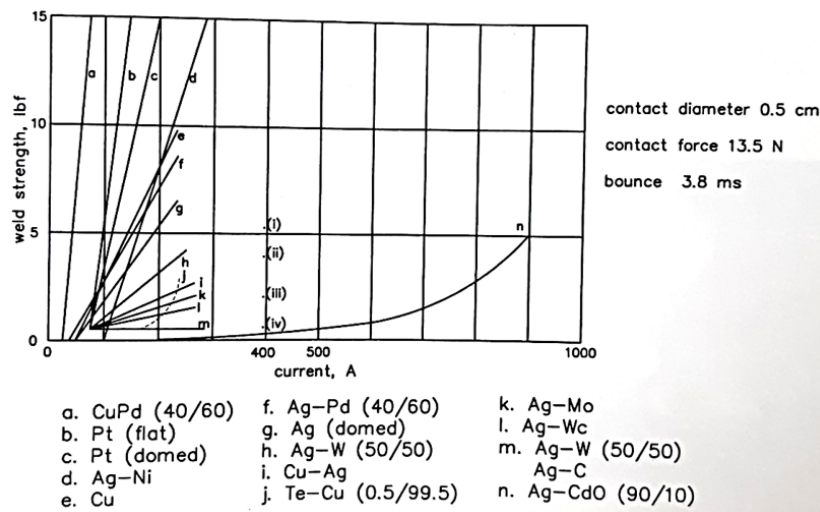


FIGURE 2.11 – Comparaison de la force de collage obtenue pour différents matériaux de contact en fonction de l'intensité de l'arc pour une durée de rebond constante. La force de collage est exprimée en lbf : $1lbf \approx 4.45N$ [9].

Si nous voulions comparer précisément les matériaux de contact présents dans les électrodes utilisées pour ce travail de thèse, nous devrions comparer le couple Ag Vs AgC ou le couple Cu Vs AgC si nous considérons le revêtement de $5\ \mu m$ d' Ag du contact mobile dégradé. Sur le graphique de la Figure 2.11 ce sont les contacts en Cu , en Ag ou en $Cu - Ag$ qui en sont le plus proches. Pour des courants inférieurs à 220 A environ, ce sont les électrodes en Cu qui développeront la plus grande force de collage, suivies par celles en Ag et enfin celles en $Ag - Cu$ qui développeront une force de collage quatre fois plus petite que celle pour le Cu . Même si cette affirmation est vraie pour les métaux cités, il faut néanmoins nuancer son extrapolation à des matériaux composites comme l' AgC . En effet, ces matériaux composites ont été développés pour être particulièrement résistants au collage, c'est-à-dire pour avoir une soudure la plus fragile possible, comme nous le verrons dans la suite de cette partie sur l'état de l'art sur le collage dynamique. Nous ne pouvons donc pas nous baser sur les propriétés de l' Ag pur pour déterminer la force de collage d'un matériau composite comme l' AgC .

2.2.2 Influence de la durée du rebond

L'influence de la durée de l'arc de rebond sur la force de collage est discutée selon [47] qui a fait une synthèse des résultats expérimentaux de la littérature. Certains auteurs ne voient pas de corrélation, d'autres montrent une augmentation de la force de collage avec la durée de l'arc de rebond, ou alors que la force de collage passe par un maximum. Au contraire d'autres auteurs désignent les arcs de rebond courts comme ceux menant à la plus grande force de collage.

Cependant la tendance qui prend le pas sur les autres pour ce qui est du nombre d'articles cités par [47] est celle d'une augmentation de la force de collage avec l'allongement de la durée de l'arc de rebond. Plus récemment les auteurs de [48] en 2015 et de [49] en 2017 arrivent à la même conclusion. Leurs travaux portent sur des contacts en Ag et en Cu pour des durées de rebonds compris entre 0,22 et 2,37 ms. La Figure 2.12 compare les résistances au collage des contacts en Ag et de ceux en Cu pour différentes plages d'intensités d'arc moyennes lors du rebond. Nous retrouvons pour ces deux couples de matériaux la tendance décrite dans le paragraphe précédent : la force de collage augmente avec l'intensité du courant d'arc. De plus, pour une même plage d'intensité de courant, les forces de collage de chaque couple de matériaux augmentent linéairement avec la durée de l'arc. Plus globalement en comparant les forces de collage des deux couples de matériaux pour les différentes plages d'intensité de courant testées, l' Ag résiste mieux que le Cu au collage dynamique puisqu'il a des valeurs de force de collage plus faibles. Cette observation est en accord avec les résultats présentés dans la Figure 2.11.

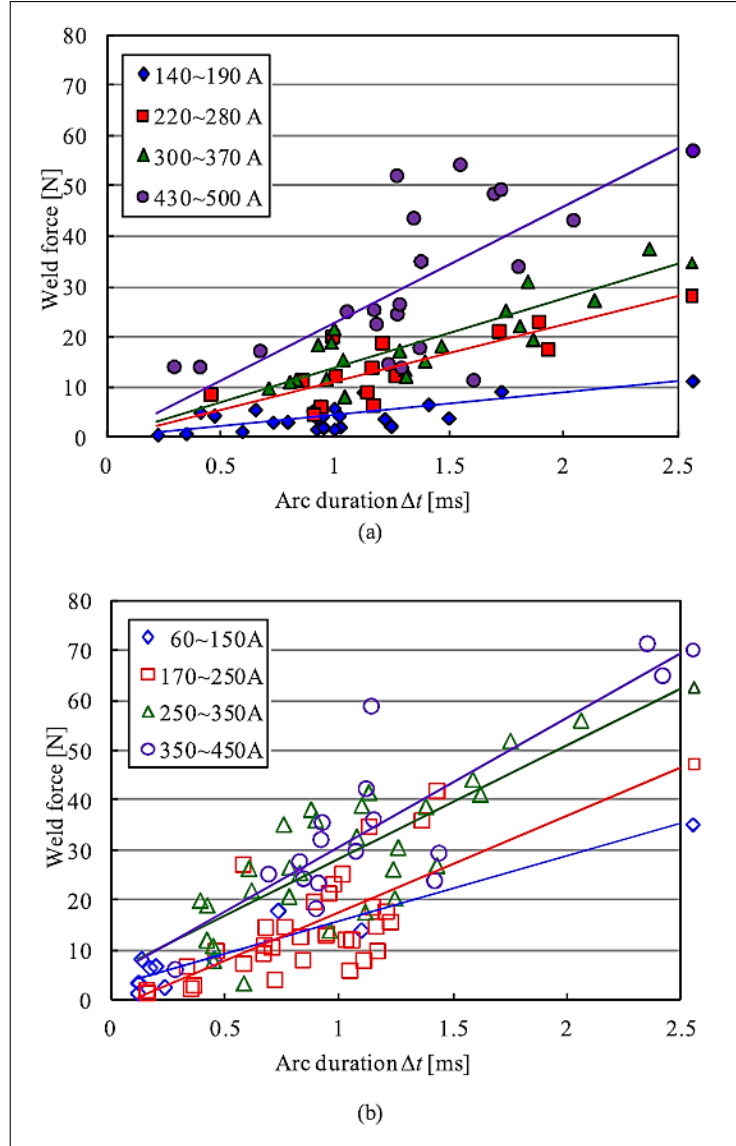


FIGURE 2.12 – Comparaison des forces de collage mesurées pour l'Ag (a) et le Cu (b) en fonction de la durée de l'arc de rebond, pour différentes plages d'intensité de courant d'arc [49].

2.2.3 Influence de l'énergie apportée par l'arc de rebond durant le rebond

Sur le même principe que l'équation (2.9) obtenue pour estimer la force de collage maximum à la suite d'un collage statique, Slade [9] propose la relation (2.11) qui estime la force de collage dynamique maximum dans le cas d'un arc de rebond entre deux électrodes très proches l'une de l'autre :

$$(F_{\text{collage dyn}})_{\text{max}} = K \cdot W_{\text{pré-arc}}^{\frac{2}{3}} \quad (2.11)$$

Avec $(F_{\text{collage dyn}})_{\text{max}}$ le maximum possible pour la force de collage dynamique en N, K le coefficient théorique défini à l'équation (2.10), et $W_c = \int_{t_{\text{arc}}} U_{\text{arc}} I dt$ l'énergie électrique de l'arc de rebond en J.

En pratique nous retrouvons dans la littérature le fait que l'énergie apportée par l'arc durant le rebond a tendance à augmenter la force de collage pour divers matériaux testés :

- Le *Cu* et l'*Ag* pour une charge électrique, grandeur en étroite relation avec l'énergie, allant jusqu'à environ 1 C (cf Figure 2.13) [49] ;
- L'*Ag* et l'*AgC* respectivement pour des énergies d'arc de rebond de 0.2 à 20 J et de 0.4 à 70 J. Ces résultats sont illustrés dans la Figure 2.14 [50] ;
- L'*AgSnO₂* pour une énergie de 15 à 100 J environ [51] ;
- Et d'autres alliages d'oxydes métalliques à base d'argent pour une énergie d'arc de rebond de 0.1 à 10 J [52].

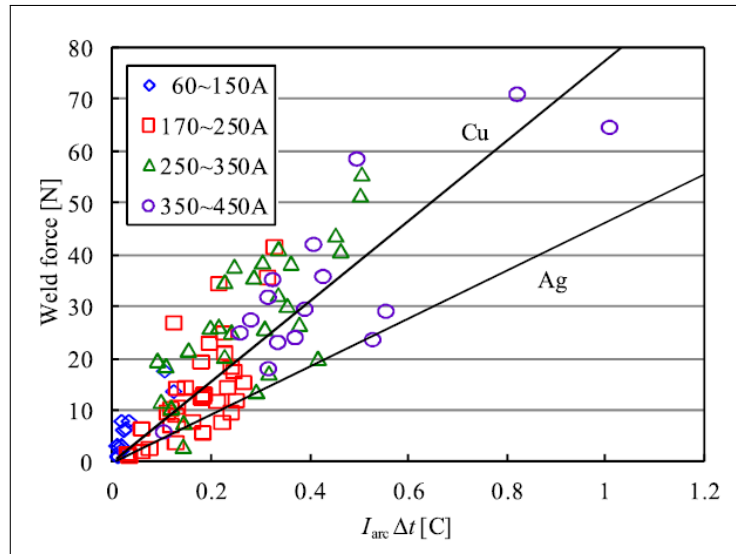


FIGURE 2.13 – Force de collage dynamique mesurées pour le cuivre et l'argent en fonction de la charge électrique de l'arc lors du rebond à la fermeture [49].

Ce résultat est cohérent avec les deux conclusions des sections précédentes : l'augmentation de l'intensité moyenne du courant d'arc de rebond augmente la force de collage dynamique, tout comme l'augmentation de la durée de l'arc de rebond. L'énergie de l'arc qui est proportionnelle à l'intensité moyenne et à la durée de l'arc de rebond augmente donc également la force de collage dynamique.

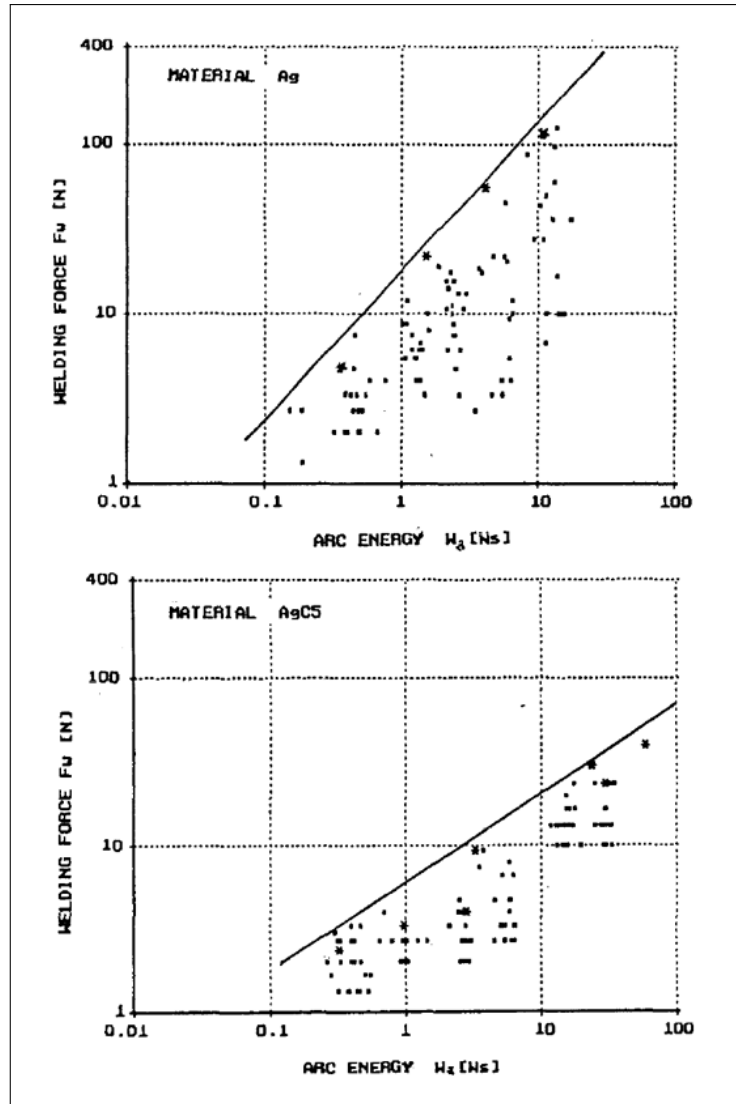


FIGURE 2.14 – Force de collage mesurée en fonction de l'énergie de l'arc lors du rebond à la fermeture pour l'Ag et l'AgC₅. La figure est extraite de l'article [50].

Walczuk [50] retrouve expérimentalement la formule (2.11) mais avec des coefficients différents pour l'Ag et l'AgC₅ (équations (2.12) et (2.13)) :

$$(F_{\text{collage dyn}})_{\text{max}} = 18.2 \cdot W_{\text{pré-arc}}^{0.88} \quad (2.12)$$

$$(F_{\text{collage dyn}})_{\text{max}} = 6.2 \cdot W_{\text{pré-arc}}^{0.53} \quad (2.13)$$

L'équation (2.13) pour le contact en AgC₅ a des coefficients empiriques plus faibles que celle pour l'Ag pur (2.11), ce qui traduit la meilleure résistance au collage du matériau composite. L'équation empirique (2.12) pour les électrodes en Ag donne également des forces de collage plus faibles que celles données avec les coefficients théoriques de la relation (2.11). Ces valeurs expérimentales de force de contact plus faibles sont souvent observées et peuvent être expliquées par plusieurs phénomènes physiques :

- Si les pieds de l'arc de rebond bougent sur la surface des électrodes, les deux zones fondues peuvent ne pas se rejoindre lors de la fermeture du contact, ce qui réduit la surface collée.
- Si la durée de l'arc de rebond est trop élevée, l'hypothèse adiabatique posée par Slade pour arriver à sa relation théorique (2.11) peut être fausse, la chaleur s'évacuant par conduction dans le reste des électrodes de contact.
- La surface de contact elle-même peut être différente du matériau de départ. En effet une usure peut se créer si le contact subit plusieurs essais électriques. De plus même lors d'un essai unique, l'érosion de la surface ainsi que le dépôt d'oxydes induits par l'arc de rebond peut mener à une surface collée plus faible, donc à une force de collage réduite.

L'effet de la dégradation des surfaces de contact au fur et à mesure des essais est d'ailleurs visible sur la Figure 2.14. Pour chaque graphique, un contact unique est testé dans six séries composées de 20 essais chacune. Les surfaces de contact sont polies avec un matériau abrasif à grains fins avant chaque début de série pour assurer un état initial similaire. Les contacts neufs et ceux polis sont représentés avec des étoiles pour les distinguer des autres essais avec contact usé par au moins un arc de rebond. Ils présentent des valeurs proches de la courbe de force maximale pour l'Ag et l'AgC₅, ce qui confirme la baisse de la force de collage pour des surfaces de contact dégradées.

2.2.4 Influence de la force de contact statique

Féchant [12] indique que la force de refermeture du contact est un paramètre essentiel pour évaluer la force de collage, mais qu'elle est rarement prise en compte de manière explicite. Lorsque les surfaces sont à une température très élevée à cause de l'arc de rebond, c'est pourtant cette force de refermeture qui conditionne l'aire de la zone d'impact qui sera ensuite soudée. Cette force de refermeture a donc bien plus d'impact que la force de contact statique F_c qui reste exercée à la fin du processus de rebond, lorsque la température du contact a baissé.

L'influence de la seule force de contact à la refermeture est ainsi difficile à corréler expérimentalement à la force de collage. En effet, les caractéristiques du rebond (force à l'instant de contact FIC, durée et hauteur du rebond, force à la refermeture) sont dépendantes des propriétés mécaniques des matériaux et de leur état de surface, de la vitesse d'entraînement du contact mobile et de la masse de celui-ci, la vitesse d'entraînement étant elle-même définie par la masse du contact mobile et la force statique qu'impose le ressort à la fin du processus de rebond. Ces dépendances sont schématisées sur la Figure 2.15.

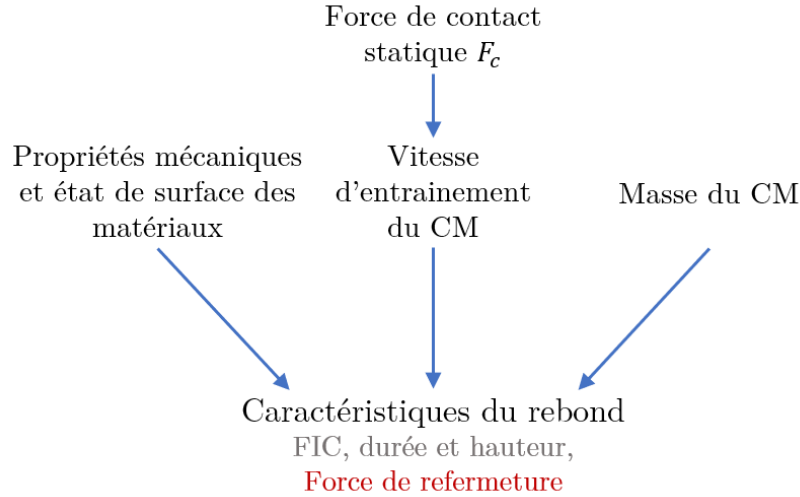


FIGURE 2.15 – Représentation schématique des paramètres expérimentaux influençant les caractéristiques du rebond à la fermeture des électrodes (CM=Contact Mobile).

Neuhaus et al [47] confirment la difficulté de corrélérer indépendamment les caractéristiques mécaniques menant au rebond avec une augmentation ou une diminution de la force de collage. Selon l'étude bibliographique réalisée dans cet article, un des auteurs ne voit que peu d'influence de la vitesse d'entraînement du CM. Pour ce qui est de la force de contact statique F_c , certains auteurs montrent une augmentation de la force de collage avec F_c , d'autres une diminution, et d'autres encore que F_c n'a pas de conséquence sur la force de collage.

2.2.5 Différence entre surface soudée et surface fondue

Récemment en 2015 et 2017, les auteurs des articles [48] et [49] ont également étudié le mécanisme de collage dynamique par arc de rebond à la fermeture sur des contacts en *Ag* et en *Cu*. La Figure 2.16 compare pour une charge électrique croissante de l'arc de rebond sur des contacts en *Ag*, l'aire des surfaces fondues à l'aire des surfaces collées. Les surfaces fondues ont été mesurées par microscopie optique alors que la courbe pointillée représentant l'aire des surfaces collées a été estimée à partir des forces de collages mesurées grâce à la relation (1.20). De cette figure, nous pouvons estimer la surface collée qui engendrera la force de collage à environ 30 % de la surface fondue.

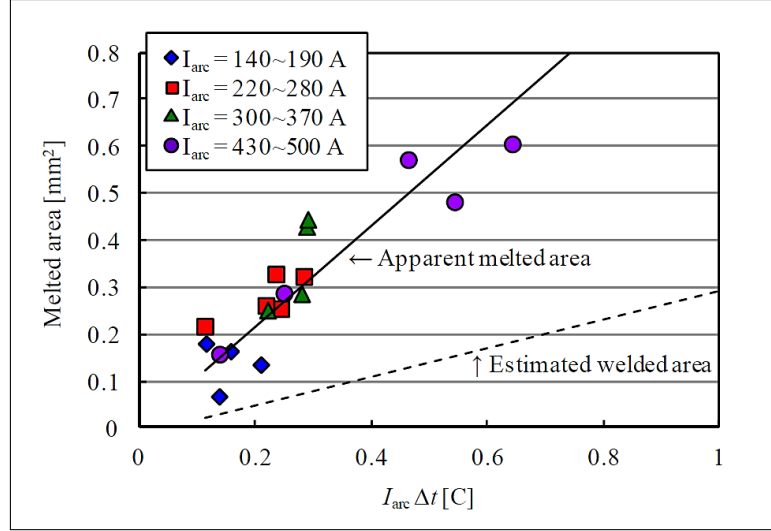


FIGURE 2.16 – Comparaison pour des électrodes en *Ag* et une charge électrique croissante, de l'aire fondue mesurée par microscopie optique à la cathode et de la ligne pointillée représentant l'aire collée estimée à partir de la relation (1.20) [48].

Pour expliquer cette différence les auteurs font l'hypothèse que des espaces microscopiques se forment à l'interface entre les deux électrodes de contact lorsque le matériau s'évapore. Étant donné que ces espaces empêchent les électrodes en fusion d'être en contact à ces endroits-là, ces zones ne peuvent pas être collées. Dans ce cas l'aire totale des surfaces collées serait plus petite que l'aire de la surface apparente fondue. Pour confirmer cette explication, un modèle numérique est développé dans les articles [48] et [49] pour calculer les aires des surfaces fondue et collée. Il se base sur une géométrie axisymétrique avec une source de chaleur représentant l'arc de rebond au centre de la surface de contact. Le rayon de la source de chaleur est défini à partir de l'intensité moyenne du courant d'arc selon [53] pour le contact en *Cu* et [54] pour celui en *Ag*. Le reste des surfaces de l'électrode sont considérées comme adiabatiques.

Les résultats de cette simulation pour différentes énergies d'arc de rebond Q_c sont illustrés à la Figure 2.17. La durée de l'arc est fixée ici à 2.0 ms. Les marqueurs en forme de triangle sont les aires obtenues par simulation dont la température de surface dépasse la température de fusion. Nous pouvons voir qu'elles sont proches des valeurs d'aires fondues mesurées au microscope optique et symbolisées par la ligne pointillée bleue. Les marqueurs en forme de ronds représentent quant à eux les aires simulées des surfaces ayant atteint la température de fusion des matériaux mais n'ayant pas dépassé leur température d'évaporation. Ces surfaces correspondent donc aux surfaces collées si on considère l'hypothèse d'espaces microscopiques faite par les auteurs. Là aussi les résultats de simulation s'accordent bien avec les résultats expérimentaux représentés par la ligne pointillée rouge. Ces résultats expérimentaux sont estimés à partir de la résistance à la traction de l'*Ag* et des mesures de la force de collage.

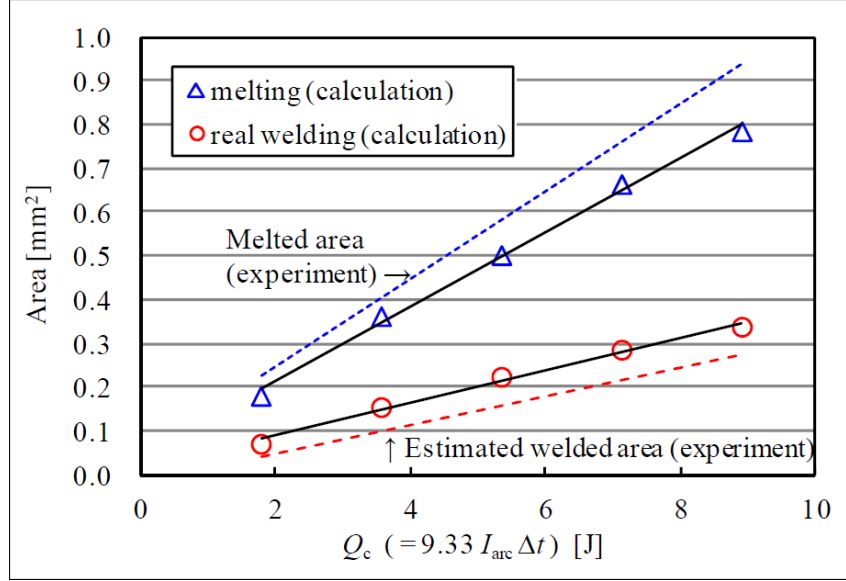


FIGURE 2.17 – Comparaison de l'aire des surfaces fondues et collées en fonction de l'énergie apportée par l'arc de rebond à la cathode pour un contact en *Ag*. Les lignes pointillées sont issues de données mesurées selon le même principe que la Figure 2.16. Les lignes pleines sont tracées à partir des résultats de simulation numérique [48].

À partir de ces résultats qui ont été également observés pour le *Cu* [49], l'hypothèse des auteurs peut être confirmée. Les surfaces collées sont bien les surfaces fondues qui n'ont pas subi d'évaporation, et la force de collage dérive de ces surfaces collées.

Dans son manuscrit de thèse [45], Morin avait déjà fait plus tôt en 2010 cette distinction entre zone collée et zone fondue en observant au MEB les surfaces de contact après avoir cassé la soudure (Figure 2.18). L'image au MEB permet d'observer à l'intérieur de la surface perturbée par l'arc des zones réparties, soit là où le métal a été collé puis arraché, soit des zones où le métal est fondu et d'aspect lisse.

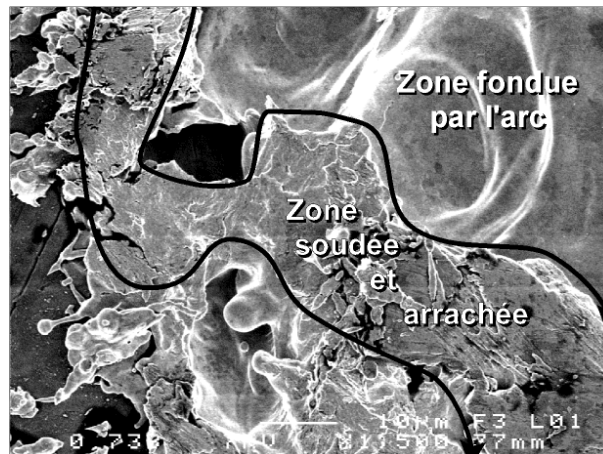


FIGURE 2.18 – Observation au MEB d'une surface de contact après avoir cassé la soudure [45].

2.2.6 Résistance au collage de l' AgC face à l'arc lors du rebond

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu la différence entre la surface fondue dont l'aire est mesurable par microscopie optique, et la surface collée qui va définir la force de collage à partir de la résistance à la traction du matériau de contact. La force de collage va donc être directement dépendante du matériau testé du fait de :

- La résistance à la traction du matériau
- Les températures de fusion et d'évaporation du matériau
- Les chaleurs latentes de fusion et d'évaporation du matériau

Pour les électrodes de contact testées durant ce travail de thèse, c'est le matériau composite AgC_4 qui a été retenu dans la conception du produit de protection. En effet l' AgC est largement utilisé pour ses propriétés anti-collage dynamique et sa résistance de contact faible et qui reste stable en présence d'un arc [9]. Pour ce domaine d'application, c'est en général un AgC composé de 2 à 5 % massique de graphite qui est utilisé. Sa fabrication doit se faire par métallurgie des poudres étant donné que l' Ag et le graphite ne peuvent pas être alliés.

Face à un arc électrique, l' AgC a un comportement particulier du fait des deux matériaux qui le composent. L' Ag fond sous la chaleur de l'arc, mais le graphite qui n'a pas de phase liquide à la pression atmosphérique se sublime. Il réagit ainsi avec l'air ambiant pour former du dioxyde de carbone. La structure de la surface de l'électrode à la fin de l'arc est donc très poreuse et friable et est principalement constituée d' Ag . C'est cette surface poreuse qui assure une bonne résistance au collage dynamique car la surface soudée est faible. La propriété anti-collage dynamique de l' AgC est illustrée à la Figure 2.19 en comparaison à d'autres matériaux de contact qui développent des forces de collages plus importantes pour une même énergie d'arc : l' Ag et l' $AgNi$. L' $AgCdO$ a également une bonne résistance au collage dynamique, ce qui en faisait un matériau de choix dans le domaine du contact électrique. Mais ce matériau a été interdit d'utilisation en Europe il y a une vingtaine d'années à cause de sa toxicité [55]. L'inconvénient majeur de l' AgC comme matériau de contact reste néanmoins son fort taux d'érosion face à l'arc à cause de la sublimation des particules de graphite [9].

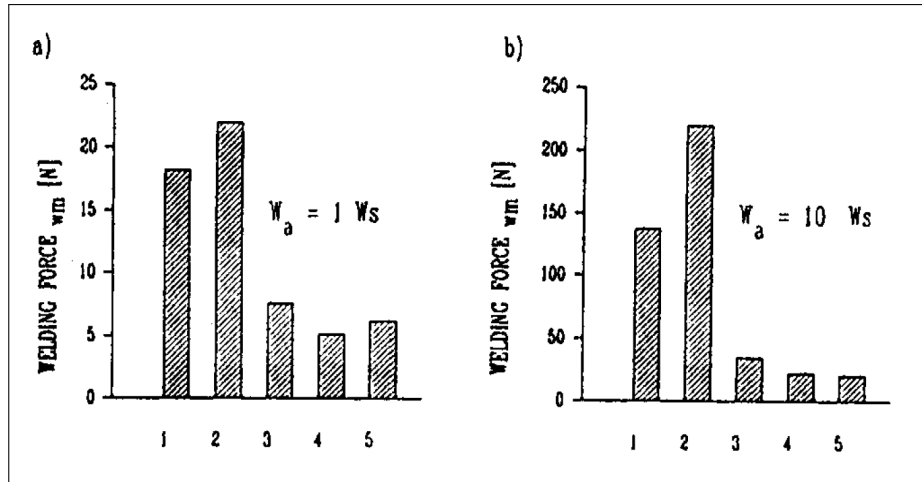


FIGURE 2.19 – Comparatif des forces de collages mesurées pour différents matériaux de contact, pour une énergie d’arc constante à (a) 1 J et (b) 10 J. 1-*Ag*, 2-*AgNi*₁₀, 3-*AgCdO*₁₀ iox, 4-*AgCdO*₁₀SP, 5-*AgC*₅ [50].

La composition de l’*AgC* et notamment son pourcentage massique de graphite joue également un rôle sur les propriétés anti-collage dynamique du matériau. La Figure 2.20 [56] illustre ce comportement pour des contacts ayant subi la même série de tests avec collage dynamique à la fermeture. La résistance au collage est bien meilleure avec l’augmentation de la teneur en graphite : la force de collage est divisée par trois entre des contacts à 3 % et des contacts à 6 % massique de graphite. Cette baisse significative de la force de collage est due à la structure de l’*AgC* après l’arc de rebond. Plus le contact en *AgC* contient du graphite, plus sa structure post-arc sera poreuse, et donc moins sa force de collage sera grande. Bien que ce paramètre ne soit pas présenté dans [56] en complément de ces mesures comparatives de force de contact, il faudra veiller à trouver un compromis pour le choix du pourcentage de graphite entre la résistance au collage et le taux d’érosion à l’arc pour ne pas trop dégrader les surfaces de contact.

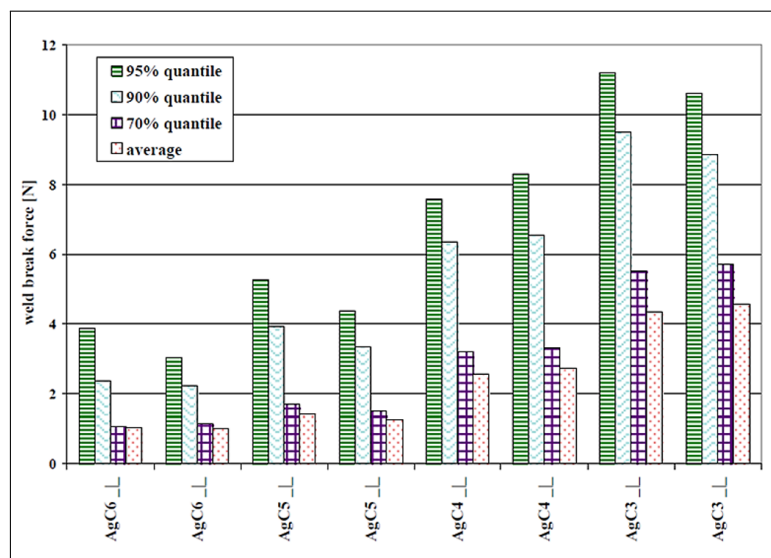


FIGURE 2.20 – Force de collage de l’*AgC* en fonction de sa composition massique en graphite [56].

2.3 Conclusion

Ce chapitre 2 est une synthèse des éléments bibliographiques présents dans la littérature et s'intéressant au phénomène de collage. C'est en effet un sujet de recherche dont l'intérêt perdure au fil des années, notamment au sein du domaine industriel, car la problématique de collage dans les produits de protection peut entraîner de forts risques de sécurité, tant pour les biens que pour les personnes.

La première partie de ce chapitre sur le collage statique a d'abord été consacrée à l'outil de mesure de la température de contact que nous avons utilisé dans ce travail de thèse. Cette mesure est très importante pour voir pendant l'essai où se trouve le contact par rapport à une éventuelle fusion. La mesure directe de température étant très délicate, voire impossible à réaliser vu la géométrie de nos électrodes de contact, nous avons choisi une méthode de mesure indirecte en utilisant la formule de Kohlrausch. Elle lie la température de contact à la tension aux bornes du contact, qui est plus facilement mesurable. Plusieurs résultats bibliographiques sont venus confirmer la pertinence de cette formule de Kohlrausch, pour différents matériaux comme l'*Ag* et le *Cu*. Néanmoins la validité de cette formule dépend de la conformité des paramètres expérimentaux par rapport aux hypothèses posées par Kohlrausch. Nous avons ainsi soulevé dans ce chapitre une question par rapport aux conditions expérimentales de ce travail de thèse : est-ce que l'onde de courant AC de fréquence 50 Hz satisfait l'hypothèse de régime quasi-statique imposée par Kohlrausch pour considérer les lignes de courant et les lignes de flux thermiques confondues. La réponse à cette question sera apportée plus tard dans ce manuscrit grâce à la simulation.

Nous avons ensuite détaillé les deux types de caractéristiques *UI* que peuvent avoir les contacts durant le passage de l'onde de courant. Ces caractéristiques sont un outil d'analyse important puisqu'il permet de voir si la fusion des matériaux est atteinte, et de suivre l'évolution de la température de contact si les conditions expérimentales d'utilisation de la formule de Kohlrausch sont réunies. Ainsi pendant les cycles *UI* en « comportement 1 », la surface de contact augmente pour s'adapter à l'intensité croissante passant dans le contact et ainsi éviter un échauffement trop important. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité du courant, les matériaux de contact vont atteindre leur point de ramollissement puis leur point de fusion qui sont tous les deux bien décelables sur la caractéristique *UI*. Si le contact a atteint sa température de fusion lors d'un premier essai, un deuxième essai avec une onde de courant identique mènera à une caractéristique *UI* totalement différente, que nous avons appelé « comportement 2 ». La surface de contact élevée assure ici un échauffement réduit qui empêche l'atteinte de la température de fusion. Pour quantifier la capacité d'un contact à ne pas fondre, la formule théorique définissant le courant limite de fusion a été donnée ainsi que l'application numérique de cette formule pour l'*Ag*. Nous verrons dans le chapitre 4 si nous retrouvons ces résultats pour le couple de matériaux testé. Nous avons également vu les phénomènes physiques agissant sur le contact à partir de la fusion des matériaux et jusqu'à la volatilisation et le départ en arc lorsque la force imposée au contact n'arrive

plus à compenser les forces électromagnétiques de répulsion. Ce cas de figure est un peu particulier car il peut mener à un collage dynamique étant donné la présence d'un arc, et non pas à un collage statique comme il est question dans cette première partie de chapitre.

Pour terminer la synthèse des éléments bibliographiques sur le collage statique, la formule théorique de la force de collage statique maximum a été détaillée en fonction de l'énergie électrique apportée aux matériaux pour arriver à la fusion. Dans cette formule, le coefficient multiplicateur qui lie la force de collage à l'énergie apportée à la puissance $2/3$ est dépendant des matériaux de contact. Cette information sur la force de collage statique maximum est utile pour le dimensionnement du mécanisme permettant l'ouverture du contact.

La deuxième partie du chapitre a regroupé les éléments bibliographiques sur le thème du collage dynamique dans le cas d'étude de cette thèse, c'est-à-dire lors de l'arc créé par le rebond à la fermeture du contact dans le disjoncteur. Outre l'influence des matériaux de contact eux-mêmes avec leur résistance à la traction et leur dureté, différents paramètres expérimentaux ont un impact sur la force de collage dynamique :

- L'augmentation de l'intensité moyenne du courant d'arc de rebond engendre de manière unanime dans la littérature une force de collage plus élevée, et ce pour de nombreux matériaux de contact usuels. Cette augmentation de la force de collage est le plus souvent proportionnelle à l'intensité pour des intensités allant jusqu'à environ 280 A.
- L'influence de la durée du rebond, l'intensité moyenne du courant d'arc étant stable, est plus discutée. La majorité des auteurs s'accordent tout de même sur le fait que l'augmentation de la durée du rebond augmente également la force de collage, et ce de manière linéaire pour des rebonds sur l'Ag et le Cu jusqu'à 2,5 ms.
- L'énergie de l'arc de rebond quant à elle découle de l'intensité moyenne et de la durée du rebond. Comme la force de collage a tendance à augmenter avec l'intensité moyenne et avec la durée du rebond, il est naturel d'observer une augmentation de celle-ci également avec l'énergie de l'arc de rebond. Nous avons ainsi donné la formule théorique de la force maximum de collage en fonction de l'énergie de l'arc. Elle se base sur le même raisonnement que pour celle en statique où il était question de l'énergie électrique apportée pour faire fondre les matériaux. Cette formule a été validée expérimentalement pour l'Ag et l'AgC₅, mais avec des coefficients qui diffèrent légèrement en fonction de l'état de surface des électrodes et en fonction de la durée et du mouvement potentiel de l'arc de rebond.
- L'influence de la force de contact statique, c'est-à-dire la force de contact établie, sur la force de collage est difficile à déterminer. C'est en effet la force de contact à l'instant de la refermeture après l'arc de rebond qui conditionne la taille de la zone soudée, et donc la force de collage induite par cette soudure. Mais cette force de refermeture est difficile à corrélérer expérimentalement à la force de collage car elle est dépendante des caractéristiques du rebond. Elle est donc rarement étudiée de

manière explicite.

Dans cette partie sur l'état de l'art du collage dynamique, nous avons ensuite détaillé la différence entre surface soudée et surface fondue ainsi que l'impact que cela a sur la force de collage résultante. En effet, si la surface fondue est observable au microscope sur les surfaces de contact, elle ne participe pas à la force de soudure. C'est uniquement la surface soudée qui lie entre elles les surfaces de contact et crée la force de collage. Lors de l'essai électrique, les matériaux de contact peuvent atteindre leur température de fusion, puis localement leur température de volatilisation ce qui va provoquer des espaces microscopiques à l'interface des deux électrodes. Aux endroits de ces espaces, les surfaces ne sont donc plus en contact et ne participent plus à la zone de soudure. Elles sont appelées surfaces fondues, tandis que les surfaces où les matériaux ont atteint leur température de fusion sans atteindre leur température d'évaporation participent bien au collage et sont appelées surfaces soudées.

Nous avons terminé cette partie sur le collage dynamique en présentant un peu plus en détails les caractéristiques anti-collage du matériau composite AgC utilisé dans une des deux électrodes testées. L' AgC_5 développe une force de contact beaucoup plus faible que l' Ag , de 2,5 à 7 fois moins selon l'énergie de l'arc de rebond, respectivement 1 et 10 J. La composition de l' AgC joue également un rôle important dans sa résistance au collage puisqu'augmenter le pourcentage massique de graphite de 3 à 6 % réduit par trois la force de collage mesurée.

À la suite de cette synthèse des éléments présents dans la littérature, nous devons bien garder à l'esprit que chacun des tests menant aux résultats présentés ont été fait dans des configurations expérimentales et avec des matériaux de contact qui diffèrent plus ou moins des nôtres. Par exemple :

- Nous utilisons un couple d'électrodes qui mène à un couple de matériaux Ag Vs AgC ou Cu Vs AgC en fonction de la destruction ou non du revêtement en Ag sur le contact mobile. Dans la littérature, il est rare de retrouver ces mêmes couples de matériaux. De plus l' AgC utilisé est spécifique étant donné l'orientation de ses fibres, son pourcentage de graphite et sa granulométrie.
- Notre onde de courant n'a pas tout à fait la forme d'une onde sinusoïdale, mais elle se rapproche d'une onde à la fréquence de 50 Hz dans sa phase ascendante. Les auteurs quant à eux disent souvent utiliser une onde sinusoïdale à 50 Hz, mais ne détaillent que rarement la forme précise de leur onde.

Nous pouvons ainsi comparer avec précaution les résultats quantitatifs de la littérature aux nôtres en n'oubliant pas que les éventuelles différences de résultats peuvent provenir des différences entre nos matériaux/conditions expérimentales et ceux de la bibliographie. Nous pouvons également retenir les tendances des courbes présentées, les observations qualitatives sur les caractéristiques UI ainsi que les formules qui s'adaptent à tous les matériaux de contact.

Chapitre 3

Dispositifs et outils experimentaux

Le chapitre 1 a souligné l'importance des contacts électriques dans les produits de protection, et particulièrement celle du contact électrique présent dans le système d'ouverture des produits. En effet le rôle de ce contact est essentiel puisqu'il conditionne la bonne réalisation de la suite de la coupure. Dans ce contexte, nous avons également vu les conséquences graves qui peuvent survenir après un phénomène de collage du contact. C'est cette problématique de collage qui est au cœur de ce travail de thèse.

Pour l'étudier, nous avons le choix entre deux types d'expérimentations : l'expérimentation in-situ directement dans le produit ou l'expérimentation sur gabarit. L'expérimentation in-situ présente l'avantage d'être la plus réaliste. Cependant elle présente dans notre cas un inconvénient majeur, une instrumentation très complexe. En effet, la compacité du produit rend difficile la fixation et le passage des fils pour la mesure de tension et quasi impossible la mesure de force de contact. De plus l'opacité des parois extérieures du produit empêche la visualisation des phénomènes par imagerie rapide et nous obligerait à modifier l'enveloppe de chaque produit testé. L'expérimentation sur gabarit présente quant à elle l'avantage de pouvoir être instrumentée nettement plus facilement. Les paramètres expérimentaux sont également mieux maîtrisés notamment en évitant les mouvements parasites présents dans le produit et résultant de l'assemblage des différentes pièces. Nous avons donc fait le choix d'une étude sur gabarit, en utilisant les électrodes présentes dans le produit et en les plaçant de la même sorte que dans le produit pour se rapprocher au maximum de la réalité.

Pour expérimenter respectivement les phénomènes de collage statique et dynamique, deux gabarits ont été mis au point et exploités sur le site de l'entreprise Hager situé à Obernai :

- un gabarit « contact électrique statique » pour l'étude du collage sans mouvement relatif macroscopique des électrodes de contact. C'est la constriction des lignes de courant qui provoque un échauffement local conduisant au collage du contact électrique.
- un gabarit « contact électrique dynamique » pour l'étude du collage avec un système motorisé qui permet le mouvement relatif macroscopique des électrodes. Ici l'échauffement menant au collage est dû à l'apparition d'un arc de rebond en plus

de la constriction des lignes de courant.

3.1 Étude du collage statique

La première partie de ma thèse a été consacrée à l'étude du phénomène de collage statique avec l'utilisation d'un premier gabarit, le gabarit « contact électrique statique ». Son but est d'étudier l'échauffement causé par le passage d'une onde de courant dans un contact électrique maintenu fermé. Son cahier des charges est le suivant :

- Maintenir mécaniquement les électrodes de contact fermées avec une force de contact statique F_c réglable et pré-contrainte avant l'essai.
- Être alimenté par une source de courant capable de faire passer une onde de courant réglable dans le contact électrique. Le déclenchement de la décharge sera initié par l'utilisateur du gabarit.

Ce premier gabarit avait été conçu il y a quelques années pour mesurer les forces de collage induites par le passage du courant dans plusieurs types de contacts de coupure. Nous avons pendant cette thèse réalisé plusieurs modifications. Les supports de contact ont tout d'abord été adaptés pour correspondre à la géométrie des électrodes testées dans ce travail, mais également pour mettre en place une mesure de tension au plus près du contact électrique, ce qui n'était pas le cas dans la version initiale du gabarit. Enfin la structure même du gabarit a été modifiée pour réduire au maximum les bras de levier présents sur les pièces le long de l'axe où est appliquée la force de contact. En effet nous avons remarqué que ces bras de levier amplifiaient la variation de force de contact due à la dilatation des pièces en aluminium avec la température.

Nous détaillerons dans la suite de ce chapitre les électrodes utilisées et leur mise en contact, le montage électrique permettant le passage du courant, ainsi que l'ensemble des diagnostics réalisés dans le cadre de l'étude sur les phénomènes physiques menant au collage statique : diagnostics électriques, mécanique, thermiques et analyse des surfaces de contact.

3.1.1 Zone de mise en contact

Électrodes de contact

Les électrodes utilisées dans le cadre de cette thèse sont celles du système d'ouverture présent dans le disjoncteur modulaire de calibre 16 A de la marque Hager. Nous avons fait ce choix afin d'être le plus réaliste possible quant à la géométrie et la composition des matériaux des électrodes. Néanmoins cela implique une interprétation des résultats et une modélisation des phénomènes mis en jeu plus complexes. Ces électrodes sont toutes issues du même lot de fabrication et ont été prélevées sur la ligne de production avant leur assemblage dans le produit. La Figure 3.1 représente les sous-ensembles de contact tels qu'ils ont été prélevés en production, avec les deux zones de contact précisées par un

rectangle rouge. Sur la photo de gauche nous pouvons voir la pastille de contact en argent-graphite (AgC) qui est un matériau composite à base d'argent avec un faible pourcentage de fibre de graphite (environ 4 % massique). Cette pastille est soudée sur un support en acier cuivré. Sur la photo de droite, la zone de contact encadrée en rouge est la partie bombée faite de cuivre pur revêtu d'une couche d'argent de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$. Dans la suite de ce manuscrit, nous appellerons « échantillon » un couple d'électrodes tel que présenté dans ce paragraphe.

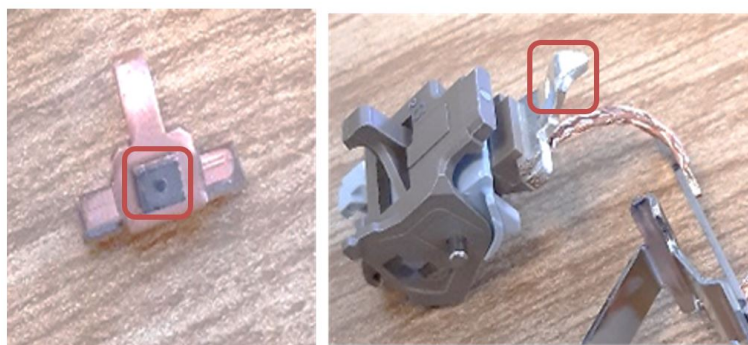


FIGURE 3.1 – Couple d'électrodes de contact : encadrés en rouge, à gauche la pastille d'argent graphite soudée sur un support en acier cuivré, à droite la partie bombée en cuivre revêtu d'argent.

Nettoyage des contacts

Avant de débiter la campagne de tests pour l'étude des échauffements dans le cas d'un contact statique, nous avons analysé pour un même couple (F_c , I_0) la tension de contact en fonction de l'intensité passant à travers plusieurs contacts de coupure du disjoncteur modulaire. Nous avons observé différentes tensions de contact qui dépendaient a priori de l'état de surface des échantillons avant essai.

Comme décrit dans le chapitre 1, la présence d'un film résistif (corrosion ou contamination externe) sur les surfaces de contact augmente la résistance globale du contact électrique [11]. La rugosité des surfaces joue également un rôle important [57][58] : une faible rugosité a tendance à augmenter le nombre de spots, et donc à diminuer la résistance du contact. Dans le cadre de nos essais, les électrodes sont issues d'un même lot de production industrielle. La rugosité des surfaces de contact est donc imposée par le processus de production industriel, et nous pouvons considérer que sa valeur est stable d'un échantillon à l'autre. Pour réduire les variations de tension inter-échantillons pour une même configuration (F_c , I_0) donnée, nous nous sommes concentrés sur la présence éventuelle d'un film résistif sur les contacts. Nous avons donc mis en place un protocole pré-expérimental de nettoyage avec un tissu optique imbibé de solvant organique de type éthanol. Le passage mécanique du tissu permet d'éliminer les poussières présentes sur les surfaces tandis que le solvant élimine les composants organiques solubles dans l'éthanol. Après la mise en place de ce protocole, la tension de contact est devenue d'avantage reproductible pour une même configuration (F_c , I_0). Nous conservons donc ce protocole pré-expérimental de nettoyage avant la mise en contact des électrodes.

Placement des électrodes

Les électrodes de contact sont placées sur des supports blancs illustrés sur la Figure 3.2. Ces supports ont été réalisés en impression 3D en matière plastique et ne sont donc pas conducteurs. Le support de la pastille d' AgC (électrode de gauche sur la photo) est à la fois maintenu et relié à l'amenée de courant du circuit électrique grâce au serrage d'une vis. Pour réduire son encombrement, le sous-ensemble contenant l'autre électrode (cuivre revêtu d'argent, à droite sur la photo) est débarrassé des pièces plastiques inutiles pour ne conserver que le surmoulage plastique brun. Son raccordement au circuit électrique est réalisé via sa tresse en cuivre par le plaquage du bilame sur la deuxième amenée de courant. La conception des supports de contact et des amenées de courant a été réalisée pour se rapprocher de la géométrie présente dans le produit. Cette approche réaliste permet ainsi de reproduire au mieux les phénomènes de répulsion électromagnétique dus à la constriction des lignes de courant et à la boucle de courant dans le produit.

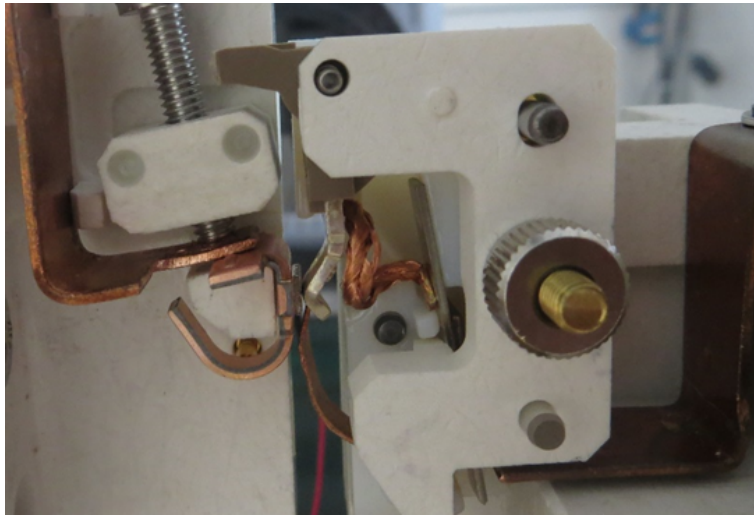


FIGURE 3.2 – Supports des électrodes.

Prises de potentiel

La Figure 3.3 indique à quels endroits sont placées les prises de potentiel pour la mesure de la tension de contact « $U_{contact}$ » (en vert sur la figure). Pour déterminer le plus précisément possible cette tension de contact, nous avons effectué notre mesure de la manière suivante : les pointes de touche sont positionnées sur des parties d'électrodes non traversées par le courant. Cela a pour avantage de ne mesurer que la tension du contact électrique, en s'affranchissant d'une éventuelle tension supplémentaire induite par la résistance volumique des matériaux traversés par le courant. De plus, le positionnement des pointes de touche et le fait de torsader les fils de mesure permettent de rendre négligeable la tension induite par la boucle de mesure.

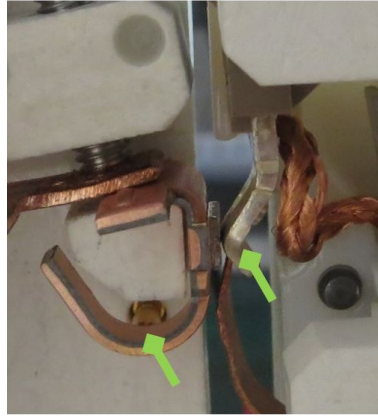


FIGURE 3.3 – Prises de potentiel.

3.1.2 Gabarit expérimental

Établissement de la force de contact statique

La Figure 3.4 présente le schéma de principe de l'équipement « contact électrique statique » dans une vue d'ensemble. Pour simplifier la représentation, seule la partie mécanique du montage a été schématisée. Nous y retrouvons les contacts (en bleu turquoise) et leurs supports (en vert) précédemment détaillés. Un mécanisme muni d'une vis micrométrique (table de positionnement en z) permet aux électrodes de se rapprocher l'une de l'autre. Une fois le contact mécanique établi, l'électrode en cuivre argenté va exercer une force de contact sur l'autre électrode grâce à la contrainte appliquée par le ressort. Sa valeur sera préréglée avant le début de chaque essai électrique. Nous l'appellerons force de contact statique F_c étant donné qu'elle ne varie pas durant l'essai. Elle est à différencier de la force de contact totale F dont F_c est une composante.

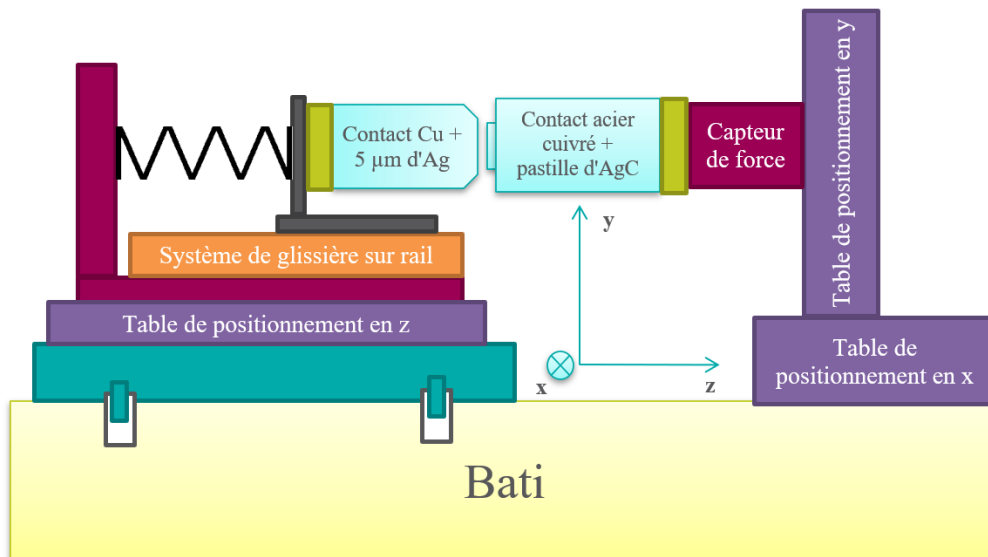


FIGURE 3.4 – Schéma de principe de l'équipement « contact électrique statique ».

Génération de courant

Une fois la force de contact statique F_c réglée, nous faisons passer un courant électrique à travers le contact pour obtenir son échauffement. Ce courant, dont l'intensité est illustrée en pointillés rouges sur la Figure 3.5, est généré par la décharge rapide de condensateurs présents dans un circuit RLC série. La forme de cette onde est ajustée grâce au réglage des valeurs de capacité et d'inductance. Elle est proche d'une demi-onde sinusoïdale de fréquence 50 Hz dans sa phase ascendante : son intensité augmente de 0 à sa valeur crête I_0 en 5 ms.

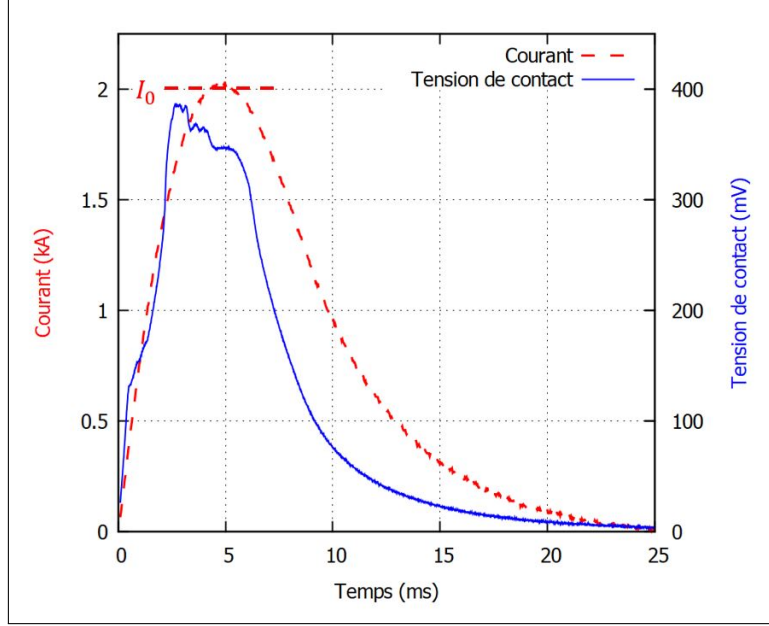


FIGURE 3.5 – Évolution temporelle de la tension de contact et du courant traversant le contact.

La Figure 3.6 représente le schéma électrique du banc de court-circuit utilisé. Le principe de ce banc a été détaillé dans le manuscrit de thèse [59]. Nous en faisons ici la synthèse. Dans un souci de simplification, seuls les interrupteurs $K1$ et $K2$ sont représentés, les autres organes de commutation et de sécurité ne le sont pas. Pour établir le courant de décharge, l'interrupteur $K1$ est fermé et l'interrupteur $K2$ est ouvert. Une alimentation à découpage permet dans un premier temps de charger un assemblage de condensateurs électrolytiques C . Ces condensateurs, de tension nominale égale à 350 V, peuvent ainsi être chargés grâce au système d'alimentation ajustable à une tension comprise entre 50 et 350 V. La diode D de roue libre protège les condensateurs d'une polarisation inverse. Une fois les condensateurs chargés, le système d'alimentation est déconnecté du circuit RLC via l'ouverture de $K1$ et l'interrupteur $K2$ est fermé pour créer le circuit RLC. La décharge des condensateurs est alors prête à être déclenchée via le thyristor T dans le circuit RLC qui fonctionne en régime pseudo-périodique jusqu'au moment où la diode D intervient en modifiant le type de circuit en un circuit RL. La fin de l'onde de courant est assimilable à une fonction exponentielle décroissante, comme nous pouvons le voir sur la Figure 3.5 à partir de $t = 7\text{ms}$. La résistance de ligne R impacte également la forme de l'onde de courant, mais elle n'est pas réglable sur cet équipement car elle est uniquement composée

de la résistance des éléments de liaison en cuivre. La tension de charge des condensateurs permet quant à elle de régler la valeur de l'intensité crête I_0 .

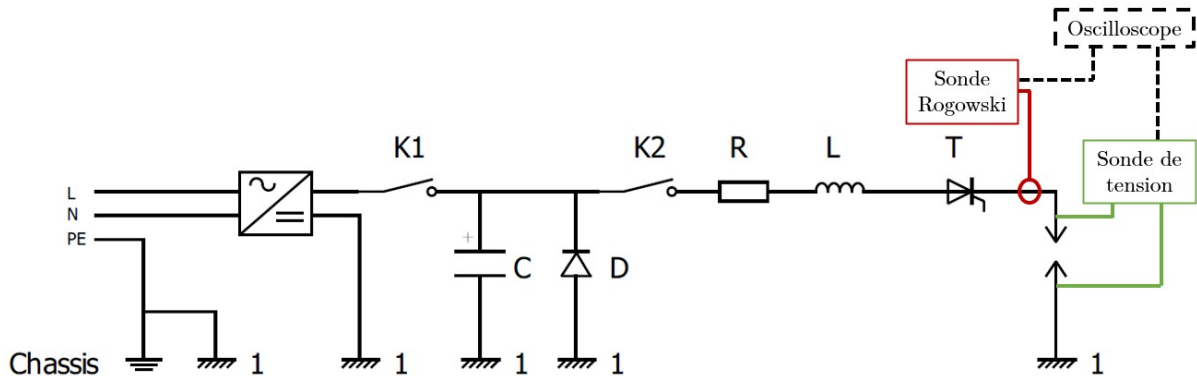


FIGURE 3.6 – Schéma électrique simplifié du banc de court-circuit. Hormis les interrupteurs $K1$ et $K2$, et le thyristor, les organes de commutation et de sécurité ne sont pas représentés pour simplifier le schéma.

3.1.3 Mesures électriques

Sonde de tension

La mesure de la tension de contact « $U_{contact}$ » est réalisée entre les points de prise de potentiel visibles sur la Figure 3.3 grâce à une sonde de tension passive de rapport 1, la TA 132 de la marque Picoscope. Le choix de cette sonde est justifié par sa bande passante de 0 à 10 MHz et par sa tension d'utilisation maximum de 600 V pic qui sont suffisantes pour la mesure d'une tension de contact de l'ordre de la centaine de mV à une fréquence d'environ 50 Hz. La précision de l'ensemble « sonde de tension et système d'acquisition » est de ± 10 mV, ce qui correspond à l'amplitude du bruit de mesure que nous visualisons sur les données brutes.

Sonde de courant

Pour la mesure du courant passant dans le contact électrique, nous utilisons une sonde de type Rogowski, le modèle CWT Mini 30B de la marque Power Electronic Measurement. Elle est capable de mesurer une intensité jusqu'à 6 kA avec une bande passante entre 0.3 Hz et 20 MHz, et est sensible à des variations d'intensité jusqu'à 40 kA/ μ s. Ses caractéristiques étaient donc a priori adaptées à nos mesures d'intensité de l'ordre de la centaine d'ampères jusqu'à environ 3 kA à une fréquence proche de 50 Hz. Nous avons centré le conducteur électrique dans la boucle de mesure de la sonde pour obtenir la précision de mesure intrinsèque indiquée par le fabricant : ± 0.2 %.

Lors des premières mesures de mise au point, nous avons remarqué une dérive de la courbe de l'intensité mesurée dont la valeur devenait négative au-delà de 25 ms, ce qui n'est pas possible en réalité vu notre montage électrique. Nous avons néanmoins choisi de continuer à utiliser cette sonde car nous nous sommes concentrés sur la phase ascendante du courant, notre but étant d'étudier les phénomènes d'échauffement menant à la fusion du contact. Lors de l'exploitation des résultats de la campagne de tests sur l'équipement

« contact électrique statique » nous avons tout de même chercher à améliorer cette mesure de courant. Pour cela, nous avons mené des mesures complémentaires de courant et de tension de contact, mais cette fois en mesurant de manière comparative le courant, avec la sonde Rogowski d'une part, et avec un shunt d'autre part (modèle B2 1000A/60mV de la marque Lumel). Ce dernier possède un courant de mesure nominal de 1 kA avec une précision de classe 0,2 selon la norme DIN 43 703. La Figure 3.7 représente un exemple de mesure comparative réalisée ici pour une intensité crête $I_0=2$ kA. L'intensité mesurée par la sonde Rogowski devient effectivement négative au-delà de 25 ms, contrairement à l'intensité mesurée par le shunt qui présente une asymptote horizontale à 0 A. Il y a également un décalage entre les deux courbes de courant visible à partir de 10 ms. Cet effet est bien connu du fabricant de la sonde Rogowski sous le nom de « droop effect ». La limitation en fréquence basse de la sonde induit un décalage de phase pour de basses fréquences. Le signal mesuré est déformé et décalé vers le bas, ce qui est le cas pour nous à partir d'environ 10 ms car le signal de courant ralentit fortement à la suite de l'entrée en conduction de la diode de roue libre, et donc de l'exclusion des condensateurs.

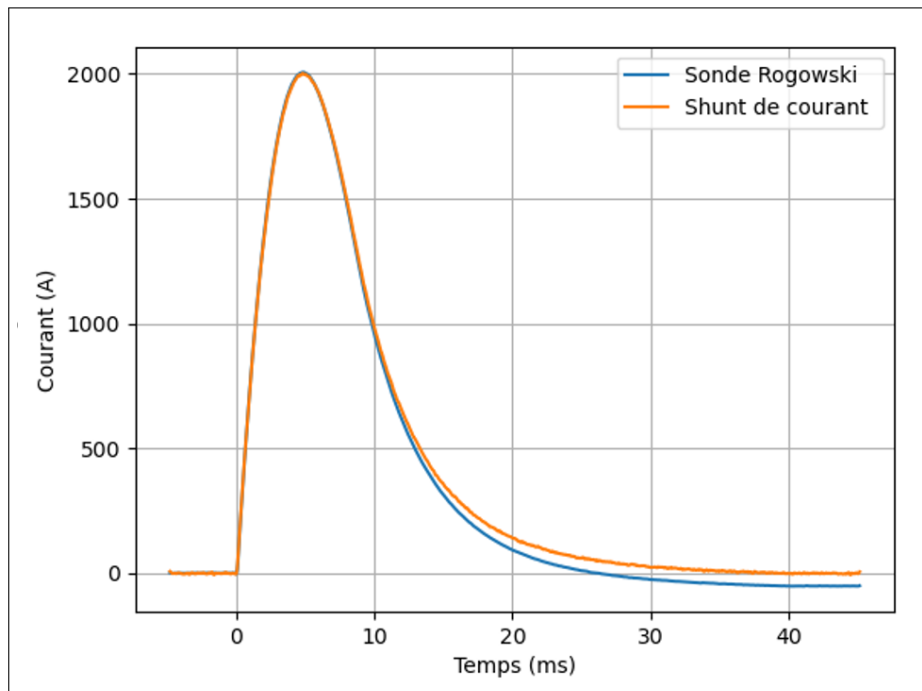


FIGURE 3.7 – Comparaison de la mesure temporelle d'un même courant par la sonde Rogowski et par le shunt.

À partir de ces mesures, nous avons tracé les caractéristiques UI du contact électrique (Figure 3 8) car c'est cette représentation électrique du comportement du contact que nous étudions pour les différentes configurations testées. Nous pouvons y voir que les courbes se superposent bien sur toute la phase ascendante du courant, ce qui est cohérent avec la Figure 3.7. Le décalage entre les deux courbes est très peu marqué et est localisé sur la phase de descente du courant qui correspond ici à la zone de solidification des matériaux de contact préalablement fondus. Or pour notre étude du collage statique, et afin de déterminer la capacité d'un contact à supporter la plus haute intensité de courant possible sans fusionner, nous nous concentrons sur les phénomènes d'échauffement se produisant

dans la phase ascendante du courant. L'impact de cette dérive du courant mesuré est donc négligeable pour l'interprétation de nos résultats. Néanmoins, étant au fait de cette dérive dans la mesure du courant avec la sonde Rogowski, nous mesurerons l'intensité du courant avec le shunt pour la suite de nos expérimentations, notamment pour l'étude du collage dynamique, afin d'avoir la mesure de courant la plus précise possible. Ce choix présente toutefois l'inconvénient de devoir utiliser des sondes différentielles de tension pour l'étude du collage dynamique, comme nous le préciserons dans la suite de ce chapitre.

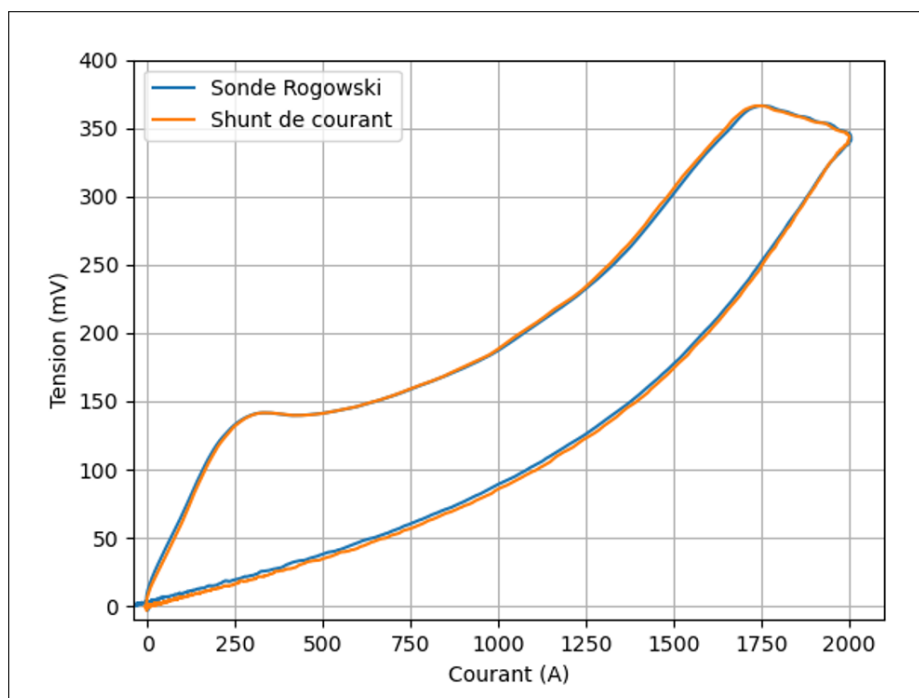


FIGURE 3.8 – Évolution de la tension de contact en fonction du courant passant dans le contact. Comparaison entre la mesure de courant par la sonde Rogowski et la mesure de courant par le shunt.

Système d'acquisition

L'acquisition des signaux électriques provenant des sondes de tension et de courant précédemment décrites se fait via un oscilloscope USB, le modèle 5442B de la marque Picoscope. Sa résolution numérique verticale est de 15 bits. Nous utilisons une pleine échelle variant de $\pm 500 \text{ mV}$ à $\pm 2 \text{ V}$, la résolution numérique obtenue est donc comprise entre $1/2^{15} \approx 0.03 \text{ mV}$ et $4/2^{15} \approx 0.12 \text{ mV}$. Pour le lancement de l'essai et de l'acquisition, nous utilisons un boîtier de déclenchement. Grâce à une commande manuelle par bouton poussoir, un signal de tension DC passe de 0 à 9 V et est envoyé en parallèle :

- pour la commande du thyristor T afin de fermer le circuit RLC et amorcer la décharge des condensateurs et donc le passage du courant dans le contact électrique,
- et pour le déclenchement de l'acquisition via l'entrée BNC dédiée de l'oscilloscope.

3.1.4 Mesures mécaniques et thermiques

Capteur de force à jauges de contrainte

Durant les essais, la force de contact est mesurée par un capteur à jauges de contrainte STD 20 N modèle en S de la marque Mecmesin. Ce type de capteur est indiqué pour des mesures de force en statique car sa fréquence propre est de l'ordre de 100 Hz.

Il est monté entre le support de l'électrode AgC et la table de positionnement en y (Figure 3.4). La force de contact varie pendant l'essai car elle est la somme de plusieurs contributions :

- La force de contact statique F_c imposée par le ressort et préréglée avant l'essai ;
- La force électromagnétique due à la constriction des lignes de courant dans le contact ;
- Et la force électromagnétique due à la boucle formée par les amenées de courant.

La force de contact statique F_c est stable durant l'essai et est une contribution positive à la force de contact. La somme des deux forces électromagnétiques est au contraire une force de répulsion qui se soustrait à F_c . Sa valeur varie au cours de l'essai, proportionnellement au carré de l'intensité du courant.

La précision intrinsèque du capteur de force est de ± 120 mN. Durant nos essais, les interférences électromagnétiques affectant l'électronique de la chaîne de mesure augmente les incertitudes de mesure à ± 300 mN.

Thermomètre

La température ambiante est mesurée avant chaque test grâce à la lecture d'un thermomètre 608-H1 de la marque Testo positionné dans l'enceinte de protection de l'équipement « contact électrique statique ». Sa précision de mesure est de $\pm 0,5$ °C. Connaître cette température est important puisqu'elle est nécessaire au calcul de la température de la striction du contact via la formule de Kohlrausch.

3.1.5 Analyse des surfaces de contact

L'analyse des surfaces de contact avant et après essai est complémentaire aux mesures électriques classiques et nous apporte de précieuses informations qualitatives et quantitatives sur l'état de surface des électrodes. Elles ont toutes été réalisées au sein du laboratoire GREMI, sur le site d'Orléans.

Les dimensions de la zone de contact étant de l'ordre de la centaine de μm , nous utilisons en premier lieu une loupe binoculaire SZ61 de la marque Olympus, munie d'une caméra numérique DeltaPix. Le grandissement x2 à x4 permet de repérer rapidement la zone de contact, ce qui sera utile par la suite pour l'observation à de plus forts grossissements. L'autre avantage de la loupe binoculaire est d'avoir une vision 3D directe et rapide de la morphologie de surface en inclinant légèrement l'échantillon observé. Pour

extraire des informations quantitatives, les électrodes ont ensuite été observées à l'aide d'un microscope optique numérique VHX-5000 de la marque Keyence à un grandissement $\times 500$. Ce grandissement est trop élevé au vu de la taille de la zone de contact à analyser, cependant c'est le plus faible grandissement dont dispose l'objectif VH-Z50T à notre disposition. Nous capturons donc pour chaque échantillon un assemblage, typiquement de 4×4 images, en 2D et en 3D. La modélisation en 3D des zones de contact est réalisée automatiquement par le microscope. En effet, il acquiert grâce à son axe motorisé une superposition d'images séparées d'un pas de hauteur constant. Puis il sélectionne pour chaque pixel de l'image 3D finale le pixel le plus net de toute la série d'images capturées. Le logiciel du microscope permet également d'extraire une image 2D à partir de cette image 3D. Ce microscope optique se révèle être un outil très adapté à nos mesures dimensionnelles, que ce soient des mesures d'aires en 2D ou des mesures topographiques avec une résolution de l'ordre du μm . C'est pour cette raison que la majorité de nos résultats quantitatifs seront extraits d'observations à partir de ce microscope. Puis, afin d'étudier plus finement la structure surfacique de la zone de contact, nous observerons un nombre réduit d'échantillons typiques de chaque configuration de test au microscope électronique à balayage (MEB) Supra 40 de la marque Zeiss, avec ici un grandissement allant jusqu'à 3000 et une résolution de l'ordre de la dizaine de μm . La composition chimique de surface sera également caractérisée sur ces échantillons grâce à un système d'analyse par spectroscopie d'énergie dispersive des rayons X (EDX) Quantax de la marque Bruker. Nous pourrions ainsi connaître la composition élémentaire d'une zone d'intérêt spécifiée ou bien afficher par cartographie colorée la distribution des éléments présents sur la zone observée. L'ensemble des mesures faites sur les équipements cités dans ce paragraphe ont été réalisées au GREMI.

Positionnement des électrodes pour l'analyse des surfaces de contact

Avant de débiter les analyses optiques et électroniques, il a été nécessaire de définir un positionnement de référence des électrodes que sera identique pour tous les instruments de mesure utilisés. Un support de contact dédié à ce type d'électrodes assure le maintien dans cette position de référence. Pour l'électrode de gauche sur la Figure 3.9, la pastille d' AgC est maintenue à l'horizontal et la partie courbée de son support en acier cuivré est dirigée vers le bas de l'image. L'autre électrode en cuivre revêtu d'argent est positionnée de telle sorte que la partie pointue de l'électrode soit orientée vers le bas de l'image et que sa partie de cuivre argenté plane soit à l'horizontal. Nous définissons ainsi un repère orthonormé (x, y, z) tel que représenté sur la Figure 3.9 avec les axes x et y dans le plan de la feuille et l'axe z vers le haut.

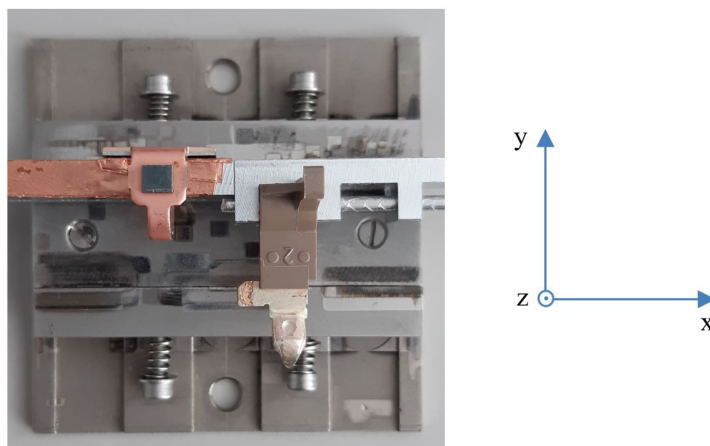


FIGURE 3.9 – Positionnement des électrodes pour l’analyse des surfaces de contact (à gauche la pastille d’*AgC* sur son support en acier cuivré, à droite l’électrode de cuivre revêtu d’argent).

Surface et morphologie

Une fois les tests électriques effectués sur les paires d’électrodes, elles sont d’abord observées à la loupe binoculaire afin de repérer les zones de contact. La Figure 3.10 illustre le repérage des zones de contact ayant conduit un courant d’intensité crête $I_0 = 2 \text{ kA}$. Elles sont encadrées en bleu. Il est à noter que sur la photo de gauche, il y a une protubérance de forme circulaire en centre de la pastille d’*AgC*. Elle est le résultat d’une aspiration de la pastille pour son maintien lors du processus industriel de collage sur son support en acier cuivré.

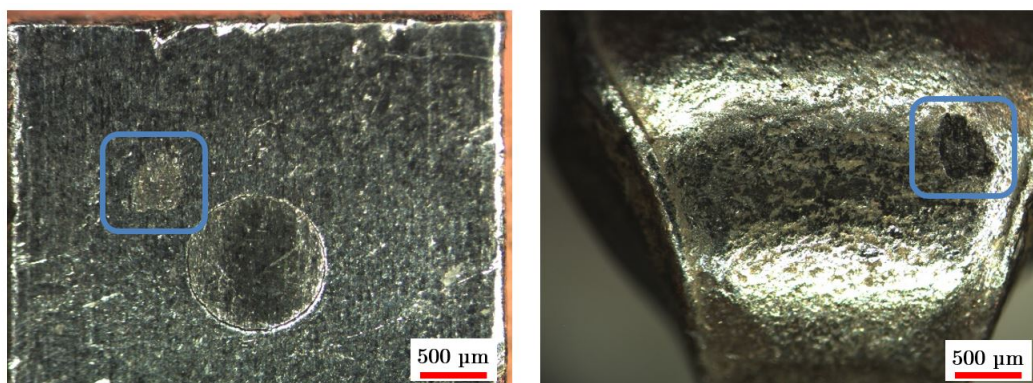


FIGURE 3.10 – Repérage des zones de contact (encadrées en bleu) à la loupe binoculaire après passage d’une onde de courant d’intensité crête $I_0 = 2 \text{ kA}$, pastille d’*AgC* à gauche, cuivre revêtu d’argent à droite (grandissement $\times 2$). La protubérance circulaire sur la pastille d’*AgC* est le résultat d’une aspiration pour la maintenir lors de l’opération de collage sur son support en acier cuivré.

Nous utilisons ensuite le microscope optique décrit précédemment pour l’analyse à plus fort grandissement. Nous acquérons d’abord un assemblage d’images 3D que nous pouvons visualiser en couleurs réelles ou en un dégradé de couleurs correspondant à l’échelle de hauteur de l’image (Figure 3.11). Lors du paramétrage de l’acquisition, nous renseignons la plage de coordonnées à analyser en x et en y , ainsi que les hauteurs minimale et maximale de la zone d’intérêt sur l’axe z . La résolution spatiale en x et en y est de $1.25 \text{ } \mu\text{m}/\text{px}$ ce qui est amplement suffisant pour réaliser des mesures de surfaces en 2D.

Pour l'axe z , nous fixons le nombre de pas de mesure à 200, ce qui est le nombre de pas maximum autorisé par le logiciel du microscope. Cela nous garantit donc la meilleure résolution en hauteur possible. La résolution en z ainsi obtenue pour la pastille d' AgC est typiquement de $0.5\mu m/pas$. Elle est suffisante pour étudier les aspérités de la zone de contact causées par le passage du courant. Cependant la forme bombée du contact en cuivre argenté nous oblige à définir une plage de hauteur plus importante pour ces électrodes. La résolution en z se dégrade, de l'ordre de 2 à 4 μm en fonction des échantillons. Cette faible résolution empêche l'analyse en hauteur de la zone de contact pour les électrodes en cuivre argenté. Nous nous concentrerons donc uniquement sur les électrodes d' AgC pour étudier les données en z . Notons que pour l'image 3D réalisé sur l'électrode en AgC , nous utilisons la fonction de correction d'inclinaison proposée par le logiciel du microscope pour avoir le plan de base de l'image qui soit bien à l'horizontale.

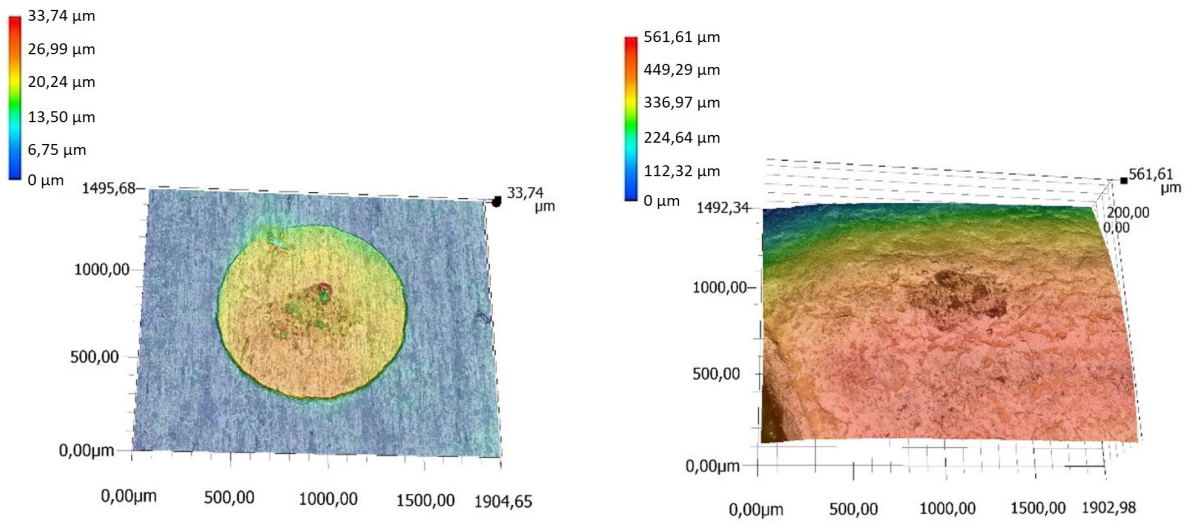


FIGURE 3.11 – Profil rugosimétrique 3D de la zone de contact et de ses alentours avec le dégradé de couleurs correspondant à l'échelle de hauteur de l'image (pastille d' AgC à gauche, cuivre revêtu d'argent à droite). Images observées avec le microscope optique après passage d'une onde de courant d'intensité crête $I_0 = 2\text{ kA}$.

À partir de ces acquisitions d'images en 3D, nous utilisons deux méthodes pour visualiser et tenter de quantifier la modification en hauteur de la surface de contact des pastille d' AgC après le passage du courant : la première est basée sur l'utilisation d'un script Matlab et la deuxième sur la fonctionnalité de profilométrie proposée par le logiciel de commande du microscope.

Après avoir lu les données de couleurs RVB et de hauteur pour chaque pixel de l'image à partir des fichiers enregistrés par le microscope, le script Matlab affiche une série de quatre images en 2D visible sur la Figure 3.12 :

- La première en haut à gauche est l'image 2D en couleurs RVB brute enregistrée via le microscope ;
- La deuxième en bas à gauche est la même image que la première, mais cette fois affichée en noir et blanc ;

- La troisième en haut à droite est issue des données quantifiant la hauteur du pixel le plus net sélectionné par le microscope pour réaliser l'image en 2D dans le plan (x, y) . Cette hauteur est indiquée grâce à une échelle de couleurs du bleu au rouge, pour le pixel le plus bas jusqu'au pixel le plus haut ;
- La quatrième image en bas à droite est une autre représentation des données en hauteur puisqu'elle met en avant les contours d'une zone de l'image située dans la même plage de hauteur.

La première image brute en couleurs réelles, telles que l'œil pourrait les percevoir à travers un instrument grandissant, sert de référence. La deuxième image en noir et blanc fait ressortir de manière plus contrastée la zone de contact où le courant est passé. Cette zone qui apparaît plus foncée à la lumière blanche du microscope est en fait une zone creusée. Cette information sur la hauteur est visible sur les deux images de droite.

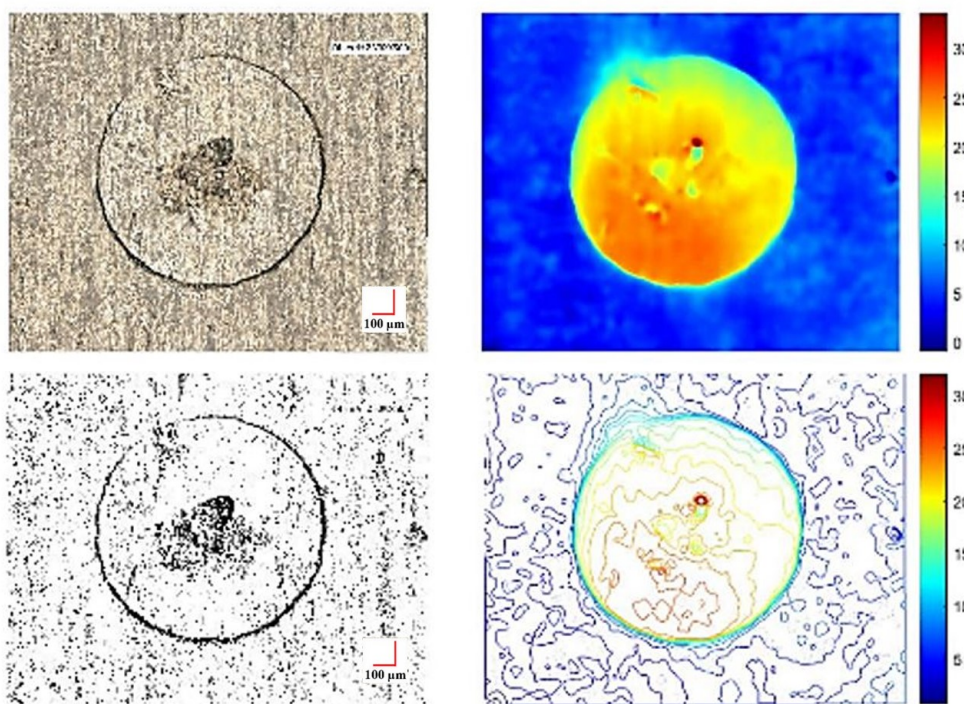


FIGURE 3.12 – Représentations de la zone observée au microscope optique via traitement par Matlab : image 2D brute (en haut à gauche), image 2D en noir et blanc (en bas à gauche), image 2D dont la couleur représente la hauteur (en haut à droite) et image 2D des contours des zones situées dans la même plage de hauteur (en bas à droite). Nous pouvons ainsi nous référer à la vue d'ensemble de la pastille d'*AgC* à la Figure 3.11 pour l'échelle en dimension. La largeur des images est de 1.905 mm et leur hauteur de 1.496 mm.

La deuxième méthode utilisée pour visualiser la modification en z de la surface de contact est la fonctionnalité de profilométrie directement disponible sur le logiciel de commande du microscope. Elle permet de tracer des profils de hauteurs selon une ligne à tracer sur l'image affichée en 2D. Pour notre étude nous choisissons arbitrairement pour chaque électrode d'*AgC* une ligne horizontale parallèle à l'axe (Ox) et une ligne verticale parallèle à l'axe (Oy) qui passent par la zone de contact, comme l'illustrent la Figure

3.13 et la Figure 3.14. Nous obtenons ainsi les profils verticaux et horizontaux visibles sur ces mêmes figures. Notons la présence d'un relief de forme cylindrique aplatie qui est la conséquence du maintien par aspiration de la pastille d'*AgC* lors de l'opération de collage sur son substrat en acier cuivré. De plus, la surface en haut de ce relief n'est pas totalement parallèle au plan (x, y) , sa zone en bas à gauche étant la plus élevée comme cela est visible sur la troisième image de la Figure 3.12 (zone en rouge). Cette différence de hauteur de bord à bord se remarque surtout sur le profil selon la ligne verticale bleue puisqu'elle est d'environ $10\text{ }\mu\text{m}$ contre $3\text{ }\mu\text{m}$ sur le profil selon la ligne horizontale magenta pour cet échantillon. Nous conservons néanmoins pour la suite ces mesures profilométriques comme une indication quantitative de la morphologie des surfaces de contact.

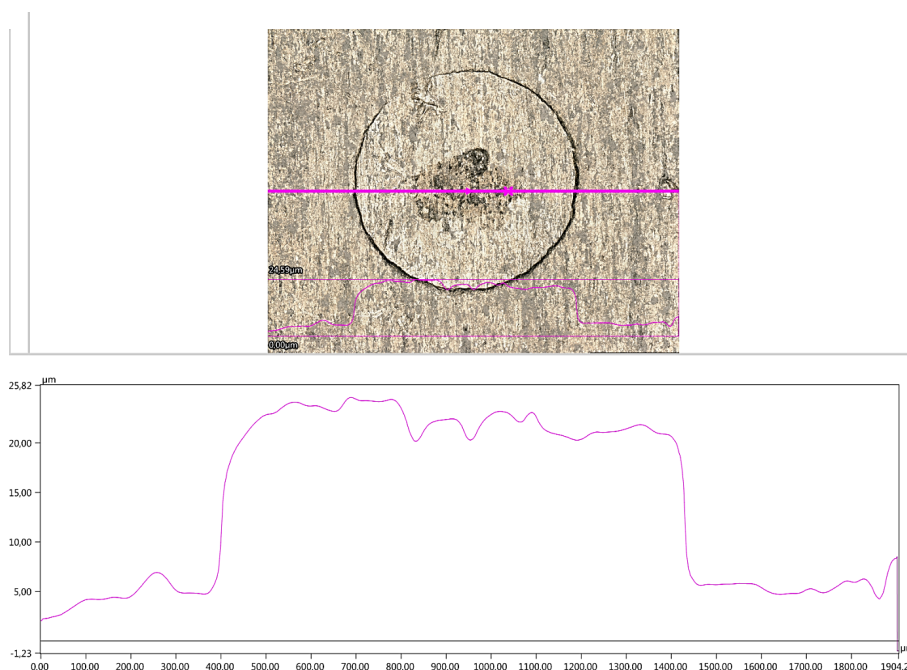


FIGURE 3.13 – Profil de hauteur de la pastille d'*AgC* selon la ligne horizontale magenta. Acquisition et analyse réalisées par le microscope optique.

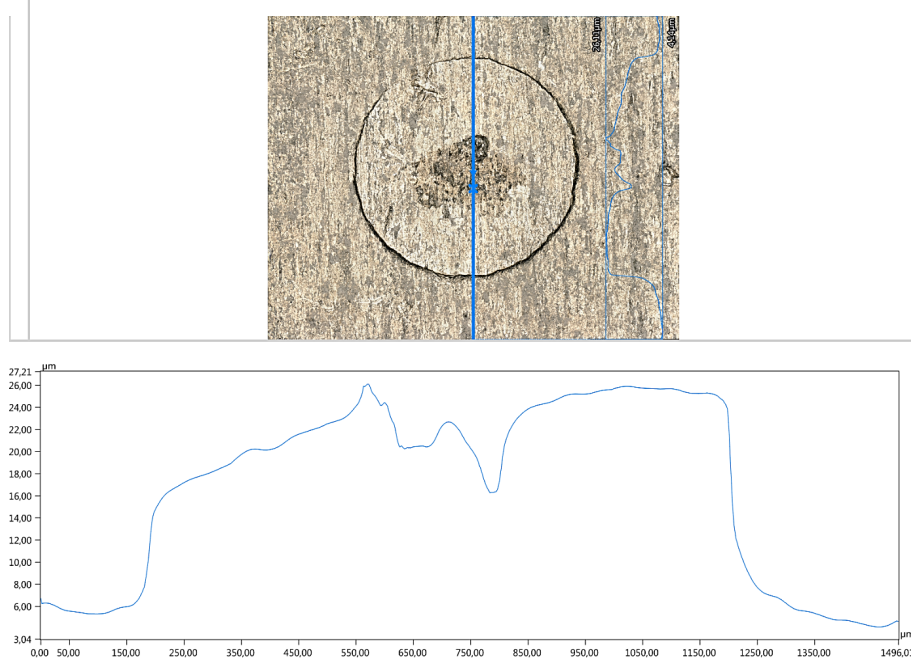


FIGURE 3.14 – Profil de hauteur de la pastille d'AgC selon la ligne verticale bleue. Acquisition et analyse réalisées par le microscope optique.

La dernière mesure dimensionnelle effectuée grâce à l'observation au microscope optique Keyence est celle de l'aire de la surface de contact. Nous en dessinons le contour point par point à partir de la différence de contraste visible sur l'image et qui correspond à une zone creusée décrite par les mesures de hauteur en 3D. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 3.15, cette surface identifiée en rouge n'est pas circulaire. Or dans la littérature, les auteurs expriment leurs résultats sous la forme d'un rayon de contact. Pour pouvoir faire une comparaison, nous calculons un rayon de contact équivalent que nous nommerons R_{eq} . Il se calcule à partir de la surface mesurée grâce à l'équation (3.1) :

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3.1)$$

Avec R_{eq} le rayon équivalent en μm et S l'aire de la surface de contact mesurée en μm^2

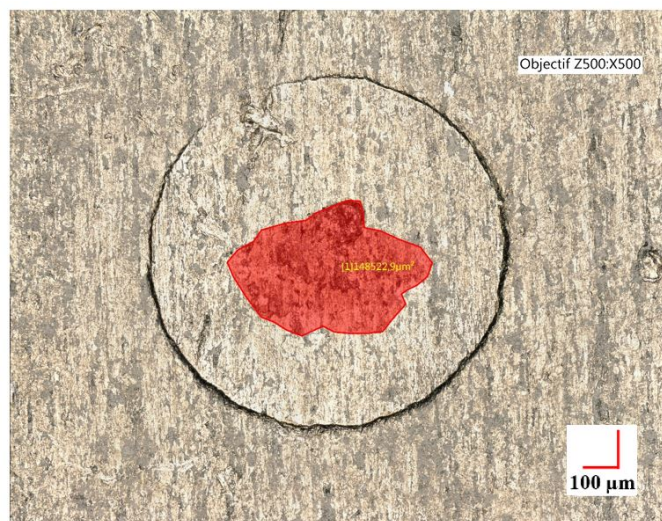


FIGURE 3.15 – Mesure de l’aire de la surface de contact en rouge sur l’électrode en AgC . Image 2D réalisée par le microscope optique Keyence.

Afin de réduire l’incertitude de mesure liée à l’erreur d’appréciation humaine lors de la définition du contour de la surface de contact, nous réitérons trois fois la même mesure à partir de l’image 2D brute. La moyenne de ces trois mesures est conservée comme valeur d’aire de surface mesurée, et leur écart-type sert au calcul de l’incertitude de mesure de type B autrement appelée incertitude de la méthode de mesurage, ici la perception de notre œil.

Structure fine et composition chimique

La première partie des observations à la loupe binoculaire et principalement au microscope optique nous informe sur la morphologie de la surface de contact des échantillons avec la mesure dimensionnelle du rayon équivalent de contact R_{equ} et avec les mesures profilométriques. Nous choisissons ensuite un nombre réduit d’échantillons typiques pour chaque configuration de test pour étudier plus finement leur structure et leur composition chimique de surface grâce à des observations au MEB muni d’un système d’analyse EDX. Ici, seule la morphologie fine de surface est analysée avec une épaisseur concernée entre 1 et 100 nm en fonction du type d’électrons détectés [60][61]. Pour constituer les images de nos échantillons, nous disposons de deux types de détecteurs qui offrent deux visions complémentaires :

- Le détecteur In-Lens pour les électrons secondaires qui fournit une image détaillée de la morphologie de la surface, sans dissocier clairement les différents éléments chimiques présents sur la surface de l’échantillon.
- Le détecteur SE2 pour les électrons rétro-diffusés qui traduit le contraste de numéro atomique entre les éléments présents à la surface de l’échantillon. Dans notre cas nous avons connaissance des trois éléments dans les matériaux des surfaces de contact : le carbone ($Z = 6$), le cuivre ($Z = 29$) et l’argent ($Z = 47$). Plus l’élément a un numéro atomique Z élevé, plus il apparaîtra clair sur l’image. L’argent sera ainsi significativement plus clair que le carbone.

La Figure 3.16 illustre pour l'exemple les images de la même surface capturée avec le détecteur InLens à gauche et le détecteur SE2 à droite à un grandissement $\times 1000$. Elles représentent le bord de la surface de contact de l'électrode de cuivre revêtu d'argent. L'image de gauche détaille bien la morphologie fine de surface alors que l'image de droite souligne le contraste chimique entre les différents éléments présents en surface :

- La partie du bas des images présente une morphologie de surface très abîmée. Deux couleurs distinctes peuvent y être distinguées avec le détecteur SE2 : un élément sombre sous forme de feuillets et un élément plus clair sans forme particulière. La forme de feuillet est caractéristique du graphite. Nous pouvons faire l'hypothèse que cette partie abîmée est de la matière composite AgC qui a été arrachée de la pastille du CF (Contact Fixe) lors de la séparation de électrodes après l'essai. Nous vérifierons cette hypothèse avec l'analyse EDX.
- La partie du milieu qui donne une impression de coulée de matière en fusion et qui s'est solidifiée en refroidissant. L'image avec le détecteur InLens fait bien apparaître les différents niveaux de solidification successifs. Le détecteur SE2 renvoie une zone assez claire, avec un effet de reflet, sans que l'on puisse faire d'hypothèse à ce stade sur la composition chimique de cette coulée.
- Tout en haut des images nous retrouvons une surface relativement lisse (peu de relief avec le détecteur InLens) et qui n'a visiblement pas été impactée structurellement par le passage du courant. De plus sa couleur avec le détecteur SE2 est claire, ce qui laisse à penser au revêtement d'argent présent sur l'électrode en cuivre.

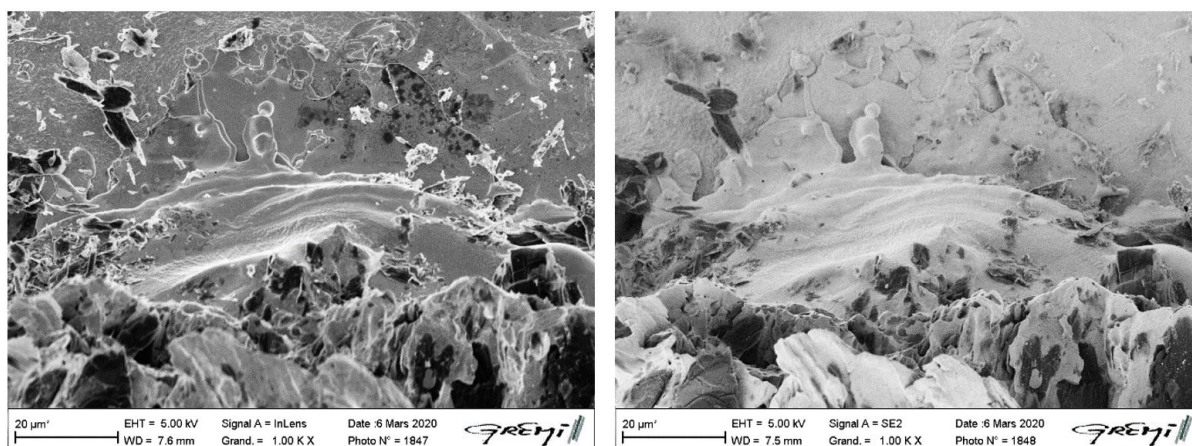


FIGURE 3.16 – Bord de la surface de contact sur l'électrode de cuivre revêtu d'argent après le passage d'une onde de courant de $I_0 = 2.8 \text{ kA}$. Images réalisées par les détecteurs InLens (à gauche) et SE2 (à droite) du MEB à un grandissement $\times 1000$.

Comme nous venons de le voir sur l'exemple de la Figure 3.16, même si le détecteur SE2 nous montre l'hétérogénéité de la surface, il ne nous permet pas d'identifier les éléments de façon certaine. En effet, même si nous connaissons les éléments constituant les matériaux des électrodes, il peut y avoir des alliages qui se forment pendant l'essai si la température de fusion des matériaux est atteinte. Il peut également y avoir des éléments chimiques supplémentaires tels que des dépôts organiques ou des contaminations

à la suite d'interactions avec l'atmosphère durant les tests et/ou le stockage. Seule une analyse EDX permet l'identification des éléments de surface présents. C'est pour cela que nous utilisons ce système d'analyse pour confirmer la présence des éléments chimiques. L'analyse de l'image de droite de la Figure 3.16 donne les résultats présentés à la Figure 3.17. Nous y retrouvons bien la matière composite AgC qui a été arrachée de la pastille de l'électrode opposée en bas de l'image, et le revêtement en Ag sur le haut de l'image (structure de surface non impactée par le passage du courant). Entre ces deux zones, la matière fondue qui a coulé sur le revêtement en argent est en fait un mélange de cuivre et d'argent. Cela constitue une preuve de la fusion des matériaux puisque le cuivre et l'argent étaient dissociés avant les tests électriques.

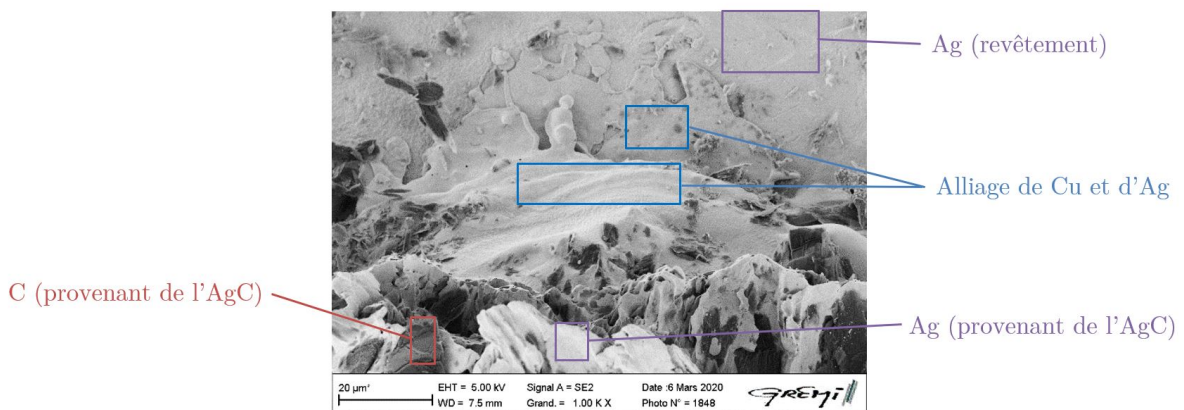


FIGURE 3.17 – Résultats de l'analyse EDX sur la Figure 3.16

3.2 Étude du collage dynamique

La deuxième partie de ma thèse a été consacrée à l'étude du phénomène de collage dynamique pour laquelle un autre gabarit de test a été utilisé, le gabarit « contact électrique dynamique ». Il se différencie du premier gabarit grâce au mouvement relatif macroscopique des électrodes qui va être à l'origine de l'apparition d'un arc de rebond. C'est principalement l'échauffement dû à ce arc qui aura pour conséquence le collage dynamique du contact.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'étude du collage dynamique se concentre sur le cas de l'arc qui apparaît lors du rebond à la fermeture brusque des électrodes de contact d'un produit de protection lorsqu'un défaut électrique est déjà présent sur la ligne. Nous garderons le même type d'électrodes que celui utilisé pour l'étude du collage statique et nous les appellerons :

- « contact fixe » (noté CF) l'électrode munie de la pastille d' AgC car elle n'est pas mise en mouvement de façon volontaire pendant l'essai,
- et « contact mobile » (noté CM) l'électrode en cuivre revêtue d'argent qui sera mise en mouvement pour réaliser la fermeture du contact électrique.

Le but du gabarit « contact électrique dynamique » est de reproduire la configuration menant au rebond à la fermeture. Il doit ainsi répondre au cahier des charges suivant :

- Simuler la fonction de fermeture brusque du CM sur le CF telle qu'elle est assurée par la serrure dans le produit de protection étudié : les paramètres de réglage pour obtenir un rebond seront la hauteur du début de la fermeture et la force de contact finale. De ces paramètres dépendront également la vitesse de fermeture et la force à l'instant de contact ;
- Être alimenté via une source de courant prête à reproduire le courant de court-circuit que provoquerait le défaut électrique présent sur la ligne. La décharge de courant se fera à l'instant du premier contact des électrodes.

Pour cette thèse, nous avons récupéré ce gabarit expérimental qui avait été conçu et utilisé il y a une dizaine d'années avant d'être rénové il y a cinq ans à l'occasion d'un stage de fin d'études. Malheureusement lorsque nous l'avons reçu, le gabarit ne fonctionnait pas. Nous avons alors réalisé un ensemble d'actions pour le remettre en état de fonctionnement et l'adapter aux contacts testés dans ce travail de thèse :

- Conception et mise au point des supports spécifiques aux électrodes du disjoncteur étudié ;
- Changement du système d'électroaimant nécessaire au déclenchement de la fermeture brusque pour gagner en rapidité d'action ;
- Vérification et remise en état de l'ensemble de l'installation électrique, visible sur la Figure 3.18 ;
- Mise en place des mesures électriques, mécaniques et optiques ;
- Débogage et adaptation du logiciel pour la commande du moteur et l'acquisition des mesures mises en place.

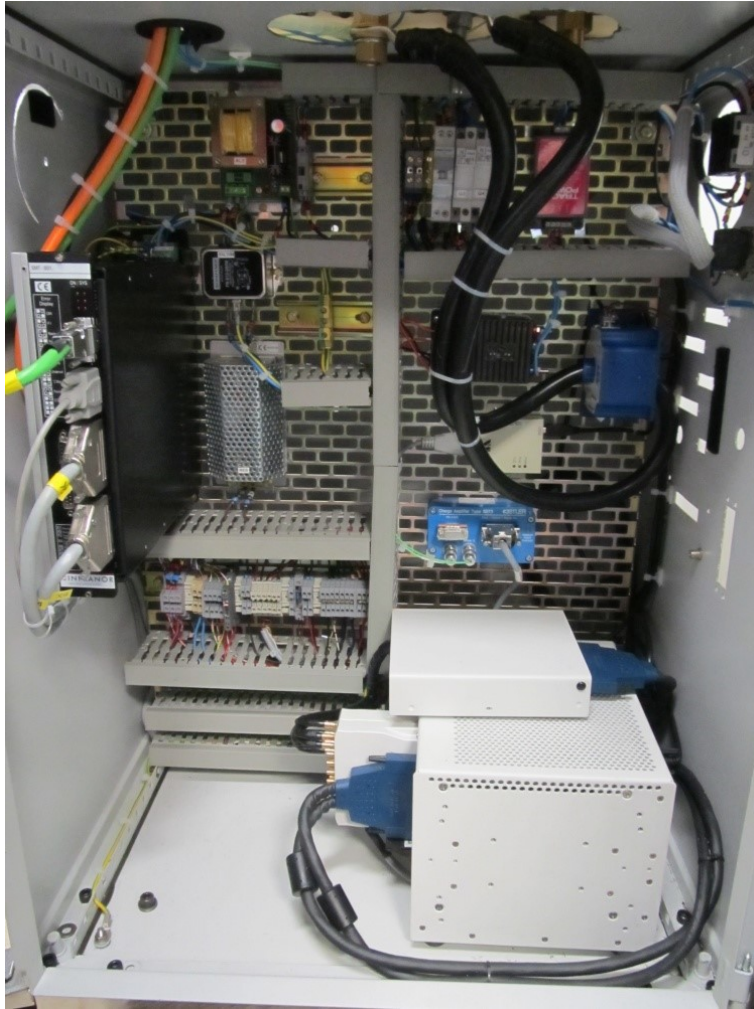


FIGURE 3.18 – Photographie de l'installation électrique servant à la commande et à l'acquisition des données mesurées sur le gabarit « contact électrique dynamique ».

Nous détaillerons dans la suite de ce chapitre l'ensemble des dispositifs expérimentaux nécessaires pour répondre à ce cahier des charges ainsi que les outils de diagnostics mis en place pour l'étude des phénomènes menant au collage dynamique.

3.2.1 Zone de mise en contact

Électrodes de contact et leurs supports

Pour cette étude sur le phénomène de collage dynamique, nous gardons le même type d'électrodes que pour l'étude sur le collage statique. Cependant leur positionnement et leur maintien est ici différent. Le contact fixe (CF) muni de la pastille d' AgC est posé sur un support léger et rigide en matière plastique noire isolante et fixé grâce aux deux dents présentes sur le haut du support (Figure 3.19). Ce support est vissé dans la tête d'un capteur de force piézométrique dont nous détaillerons la mesure plus tard dans le paragraphe. La rigidité de la pièce plastique assure une juste transmission de la force de contact entre le CF et le capteur de force. Le contact mobile (CM), et plus précisément sa partie en plastique gris clair, est quant à lui fixé sur un support blanc de forme cylindrique qui est relié à l'arbre de sortie du moteur (Figure 3.20). La mise en mouvement de ce CM

sera expliquée ultérieurement dans le paragraphe.

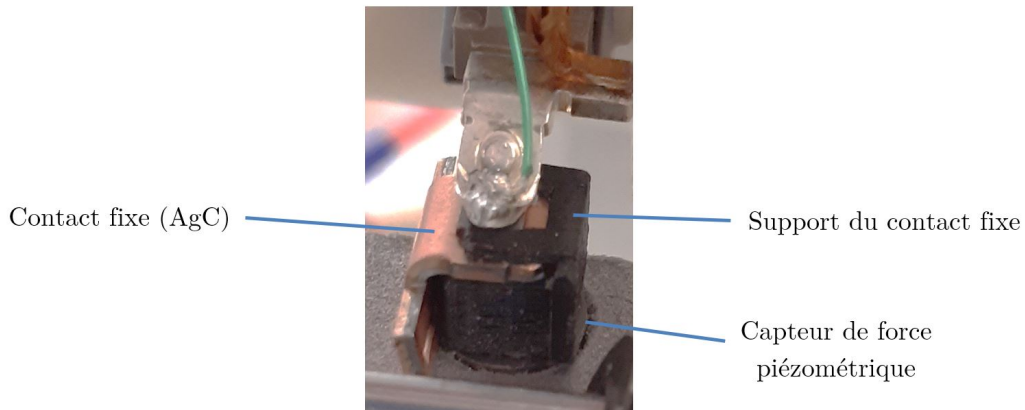


FIGURE 3.19 – Positionnement du contact fixe (CF) sur son support noir lui-même fixé sur le capteur de force piézométrique.

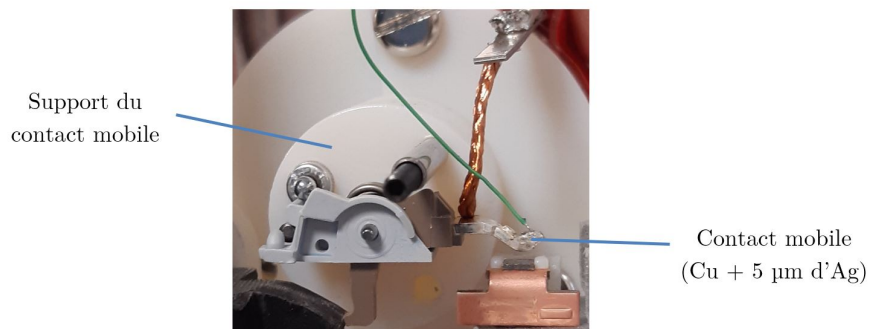


FIGURE 3.20 – Positionnement du contact mobile (CM) sur son support blanc lui-même fixé à l'arbre de sortie du moteur.

Mesure de la tension de contact

Pour garder une mesure de la tension de contact la plus précise possible, nous conservons la méthode de mesure déjà utilisée dans le gabarit « contact électrique statique ». Le placement des prises de potentiels sur des parties d'électrodes non traversées par le courant permet ainsi de ne mesurer que la tension de contact comme cela est illustré dans la Figure 3.21 qui est une représentation simplifiée de la réalité du gabarit.

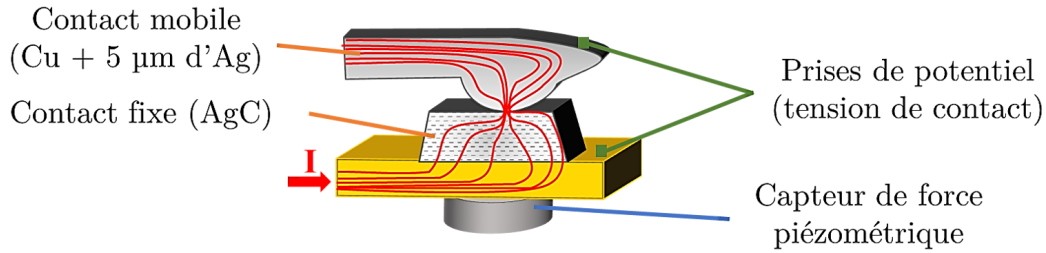


FIGURE 3.21 – Représentation simplifiée du contact électrique avec en rouge les lignes de courant. Les prises de potentiel aux bornes du contact électrique se font sur des parties d'électrodes non traversées par le courant.

3.2.2 Mise en mouvement

Mécanisme utilisé pour reproduire la fermeture brusque

Afin de reproduire le plus fidèlement possible la fermeture brusque présente dans le produit de protection et décrite au chapitre 1, nous conservons le sous-ensemble visible sur la Figure 3.22. La mise en œuvre du mécanisme utilisé pour reproduire la fermeture brusque peut se décomposer en trois étapes :

- Image 1 : La partie plastique gris clair, solidaire de l'arbre de sortie du moteur, impose le mouvement de rotation au sous-ensemble.
- Image 2 : Une fois que le bec de la partie en plastique brun a atteint la pièce de retenue noire, l'électrode de contact va s'immobiliser malgré la rotation du moteur qui se poursuit. La distance inter-électrode, appelée « hauteur de lâcher », est maintenue constante jusqu'au déclenchement de la fermeture brusque. Pendant cette étape, l'énergie générée par la rotation du moteur est emmagasinée dans un ressort de torsion appelé « ressort de contact ».
- Image 3 : La baisse de la pièce de retenue via la commande d'un électroaimant présent sur l'équipement libère l'électrode de contact qui va se fermer sur le CF avec une vitesse dépendante de l'énergie restituée par le ressort de contact : c'est la phase de fermeture brusque.

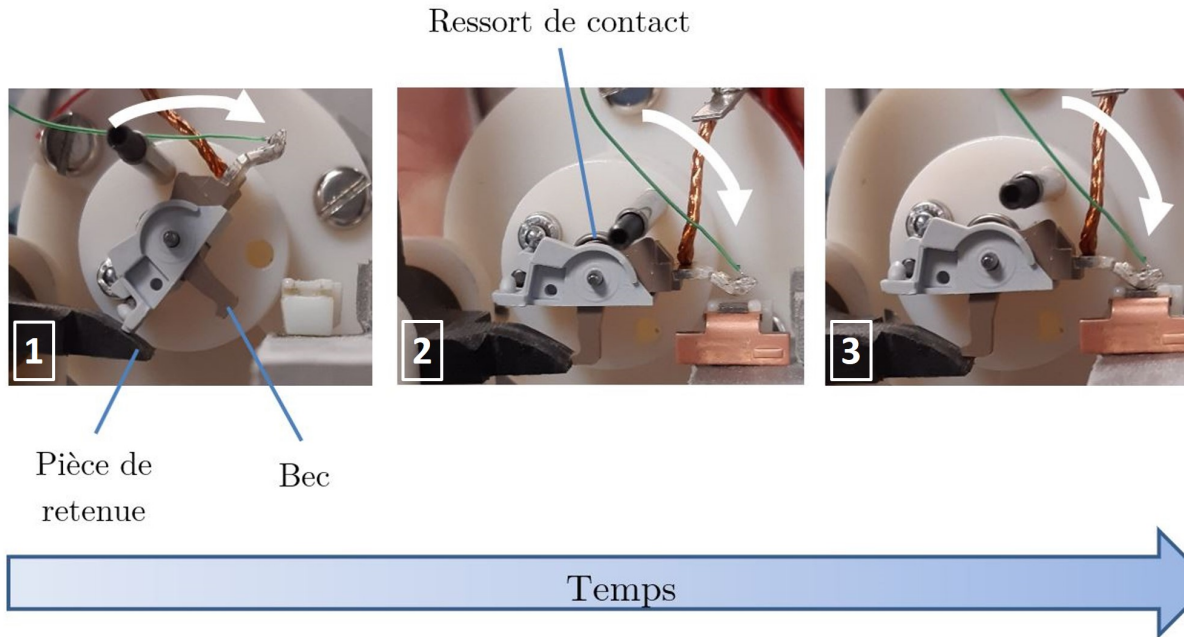


FIGURE 3.22 – Illustration du mécanisme reproduisant la fermeture brusque (images successives chronologiquement).

Pilotage du moteur et de la pièce de retenue

Pour le contrôle de l'équipement « contact électrique dynamique », nous avons mis au point un programme Labview servant d'interface entre l'utilisateur d'une part et le système de commande et d'acquisition d'autre part. Ce programme comporte quatre onglets dont nous allons détailler les fonctions :

Initialisation

Le moteur utilisé pour la mise en mouvement du CM est un moteur BLS 072 de la marque Infranor. Il est muni d'un codeur incrémental capable de mesurer la vitesse angulaire du support du CM ainsi que sa position angulaire relative. L'onglet « Initialisation » permet à l'utilisateur de déplacer le support du CM du nombre de degrés souhaité et à une vitesse entrée en paramètre pour l'amener à la position de départ voulue. Dans notre cas, cette position est celle visible sur l'image 2 de la Figure 3.22. Une fois cette position atteinte, la mesure est mise à zéro par l'utilisateur pour que cette position de départ serve de référence. La mesure de force de contact est également mise à zéro à ce moment-là puisque les électrodes ne se touchent pas. Par ailleurs cette mise à zéro est nécessaire avant chaque début de test du fait de la dérive de mesure en statique qui est inhérente au type de capteur de force utilisé (capteur piézométrique) à cause du phénomène d'accumulation de charges.

Définition de la séquence

Comme son nom l'indique, le deuxième onglet nous sert à définir la séquence de commande du moteur, c'est-à-dire la façon dont le support du CM va se mouvoir. Nous pouvons ainsi définir une ou plusieurs phases de mouvement caractérisées par un angle

et une vitesse de rotation. Le chronogramme de la Figure 3.23 illustre les positions de l'arbre moteur et du contact mobile lors de nos essais. Nous définissons une première phase de rapprochement des électrodes avec une rotation du moteur de 0 à 25° en 1 s . Cette phase permet de balayer les trois étapes précédemment explicitées pour reproduire la fermeture brusque. Nous définissons également l'angle de fermeture brusque à 24° . Lorsque l'arbre de sortie du moteur atteint cet angle, les électroaimants sont alimentés pour faire se baisser la pièce de retenue, ce qui libère le CM pour l'étape de fermeture brusque. Le CM ne rejoint pas la position de l'arbre moteur à 25° car il entre en collision avec le CF. La différence de position entre le CM et l'arbre moteur sert à imposer la force de contact via la torsion du ressort du contact. Nous définissons ensuite une deuxième phase qui sera utile à la fin de l'essai électrique pour mesurer la force de collage. Nous la faisons débuter 250 ms après la première phase, à l'instant t_{retour} sur le chronogramme, ce qui est le délai minimum de réponse du système de commande et du moteur. La rotation se fait ici en sens inverse de 25 à 0° en 1 s . Lorsque le contact est collé, la position du CM reste stable car il est lié au CF. Au moment de la rupture du collage, le ressort de contact revient à sa position d'équilibre et les positions du CM et de l'arbre moteur se superposent. Une fois ces étapes enregistrées, nous pouvons ensuite enregistrer la séquence pour éviter de devoir la redéfinir à chaque test.

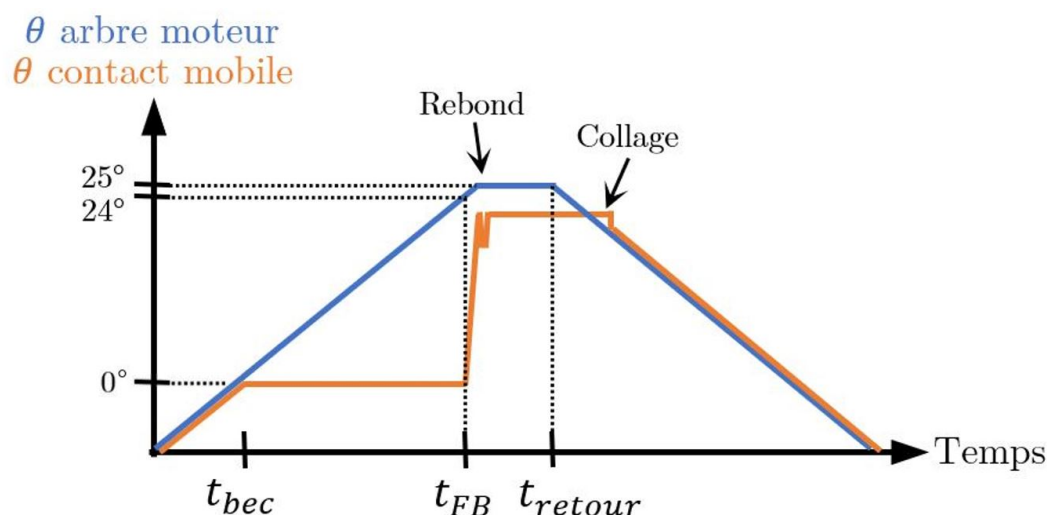


FIGURE 3.23 – Chronogramme des positions de l'arbre moteur et du contact mobile pendant un essai sur le gabarit « contact électrique dynamique ». L'instant t_{bec} représente le moment où le bec du CM commence à être maintenue par la pièce de retenue. À t_{FB} , la fermeture brusque débute : l'arbre moteur atteint 24° et l'électroaimant retire la pièce de retenue pour libérer le CM. Le moteur commence son retour en arrière à l'instant t_{retour} .

Pour éviter au maximum la dérive de mesure du capteur de force en statique, cette étape de définition/enregistrement peut s'effectuer indépendamment et avant les étapes des trois autres onglets.

Chargement de la séquence

Cet onglet nous permet de charger une séquence précédemment enregistrée.

Lancement de la séquence

Dans ce dernier onglet, nous pouvons lancer la séquence du moteur permettant la mise en mouvement du support du CM. Une fois l'essai terminé, nous pouvons visualiser les graphiques des différentes données acquises puis exporter ces données pour les enregistrer sous forme de fichiers .csv.

3.2.3 Montage électrique

Amenées de courant

Pour cet équipement « contact électrique dynamique », les amenées de courant ont été réalisées par soudure. Nous soudons pour chaque CF un fil souple de cuivre sur la partie plane en acier cuivré, visible de face en bas à droite de la Figure 3.20. Du côté du CM, la soudure du fil souple de cuivre est réalisée sur la lame en acier solidaire de la tresse de cuivre. Cette soudure est visible en haut à droite de la Figure 3.20. Pour éviter tout mouvement parasite de l'ensemble « tresse - lame en acier – fil de cuivre » qui pourrait venir tirer sur le CM et modifier le mouvement imposé par le moteur, nous fixons avec du scotch le début du fil en cuivre.

Génération du courant

La source de courant utilisée pour ce gabarit est quasi identique à celle utilisée pour le gabarit « contact électrique statique ». Sa description peut être retrouvée dans le paragraphe correspondant. Elle diffère néanmoins par le type de déclenchement de la décharge. Pour le gabarit « contact électrique statique », les électrodes sont maintenues fermées, nous utilisons donc un thyristor pour le déclenchement. Alors que dans le cas du gabarit « contact électrique dynamique », le contact est ouvert avant le début de l'essai, puis il se ferme, ce qui déclenche la décharge de courant lors du premier contact. Ici, il n'y a donc pas besoin d'utiliser un thyristor pour le déclenchement.

3.2.4 Diagnostics électrique et mécanique

Une représentation schématique de l'ensemble des diagnostics électriques, mécaniques et optiques est présente en Figure 3.24 . Nous pouvons nous y référer pour illustrer tous les paragraphes restants dans ce chapitre.

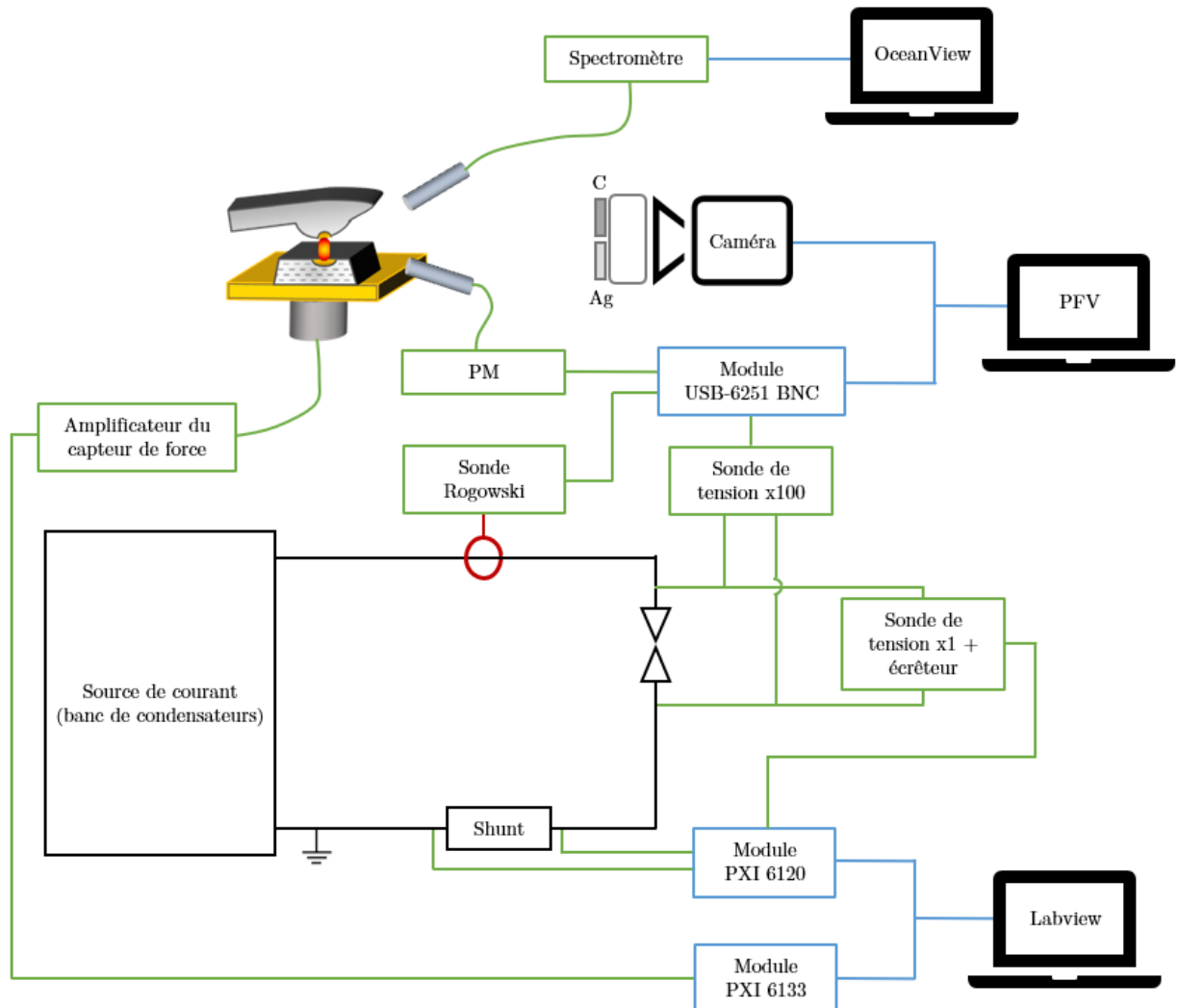


FIGURE 3.24 – Vue d'ensemble des diagnostics présents sur le gabarit « contact électrique dynamique ».

Shunt de courant

Comme expliqué dans le paragraphe précédent sur la mesure de courant avec le gabarit « contact électrique statique », nous avons choisi une mesure via le shunt de courant (modèle B2 1000A/60mV de la marque Lumel). Pour obtenir l'information de l'intensité du courant traversant ce shunt, la tension à ses bornes est mesurée directement par une entrée analogique du module d'acquisition PXI-6120 de la marque National Instruments (NI). Ce module a une résolution de 16 bits et une fréquence d'acquisition de 800 kHz.

Sonde de tension avec écrêteur

La mesure de la tension de contact ne peut pas se faire directement ou à l'aide d'une sonde de tension passive comme c'était le cas avec le gabarit précédent. En effet, une mesure directe sur le module d'acquisition PXI-6120 court-circuiterait ici le shunt de courant via la masse commune du module. Nous utilisons donc une sonde de tension différentielle, le modèle DP 30 HS de la marque Pintek. Nous l'utilisons en calibre x 1 pour que nos mesures de faibles valeurs de tension de contact (de l'ordre de la dizaine

à quelques centaines de mV) ne soient pas trop bruitées. À ce calibre la précision de la sonde est de $\pm 2 \%$ avec une bande passante de 0 à 15 MHz ce qui est suffisant pour notre besoin. Cependant ce calibre nous impose une plage de mesure limitée à ± 6.5 V. Nous devons donc faire attention à ne pas endommager la sonde avec la tension de l'arc lors du rebond (supérieure à 10 V) ou avec la tension de charge des condensateurs (de 50 à 350 V) si le contact est ouvert et sans arc de rebond. Pour obtenir à la fois une mesure fiable et à la fois éviter d'endommager la sonde, nous avons cherché un moyen d'écarter les valeurs de tension élevées sans perturber la mesure des valeurs de tension plus faibles. La thèse de Lembeye [62] donne un exemple d'un tel type d'écarter. Pour notre application, nous avons équipé la sonde de tension d'un écarter qui limite la tension en entrée de la sonde à 3.6 V et dont le schéma électrique est représenté à la Figure 3.25. La bande passante du dispositif « sonde et écarter » est comprise entre 0 et 100 kHz.

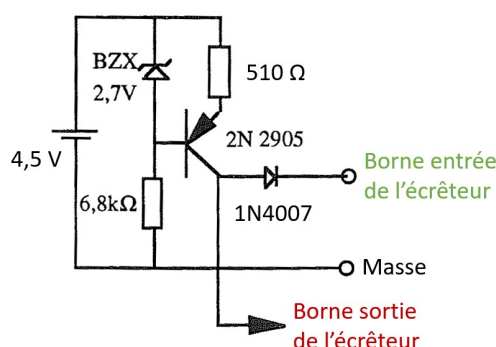


FIGURE 3.25 – Schéma électrique de l'écarter utilisé sur le gabarit « contact électrique dynamique ».

Capteur de force piézométrique

Lors de l'étude sur le collage statique avec le gabarit précédent, le but était de régler la force de contact statique F_c avant le début de l'essai. Le capteur à jauges de contraintes était donc indiqué pour ce type de mesure. Quant au gabarit « contact électrique dynamique », notre but est d'avoir une mesure la plus précise possible de la variation de la force de contact tout au long de l'essai. Nous voulons notamment détecter la perte de la force de contact durant le rebond (environ 0.2 ms), ainsi que les oscillations de force à la suite de l'impact du CM sur le CF. Avec une fréquence propre de l'ordre de la centaine de Hz, le capteur à jauges de contraintes ne suffit plus. Nous avons donc opté pour un capteur de force de type piézométrique, le modèle 9217A de la marque Kistler. Ce capteur est relié à un amplificateur de charges de type 5073 de la même marque. L'ensemble « capteur – amplificateur » a une fréquence propre d'environ 25 kHz. Le signal en sortie de l'amplificateur est relié à une entrée analogique présente sur un deuxième module d'acquisition de la marque NI, le PXI-6133, de résolution 14 bits et de fréquence d'acquisition 2.5 MHz. Ce capteur nous permettra également de mesurer la force de collage environ 250 ms après le passage de l'onde de courant.

3.2.5 Diagnostic optique de l'arc de rebond

Pour enrichir les mesures électriques et mécaniques qui sont habituellement réalisées sur ce type d'expériences, nous avons décidé de les coupler à un diagnostic optique de l'arc présent lors du rebond. L'objectif est de caractériser les éléments présents dans l'arc et notamment définir quels matériaux des électrodes de contact y sont présents. Le second objectif est de faire le lien entre les espèces présentes dans l'arc et la force de collage mesurée à la fin de l'essai. Nous avons d'un côté une visualisation de l'arc de rebond par imagerie rapide synchronisée à une détection de l'arc par photomultiplicateur (PM), et de l'autre côté une analyse des espèces présentes dans l'arc grâce à la spectroscopie. L'ensemble de ces diagnostics optiques ont été réalisés dans l'obscurité pour ne pas saturer le PM et le spectromètre qui sont très sensibles à la lumière.

Imagerie rapide et détection de l'arc de rebond

Pour le diagnostic par imagerie rapide, nous possédons une caméra rapide Fastcam SA5 de la marque Photron. Dans le but de définir quels matériaux des électrodes de contact sont présents dans l'arc de rebond, nous avons décidé d'équiper cette caméra rapide d'un doubleur d'image muni d'un filtre interférentiel différent sur chacune de ses deux voies optiques. Les éléments chimiques présents dans les électrodes de contact sont l'argent et le carbone pour le CF et le cuivre et l'argent pour le CM. Pour visualiser l'argent, nous avons choisi d'utiliser le filtre interférentiel 03FIL049 de la marque CVI Melles Griot (543.5nm – FWHM 10 nm) et pour le carbone le filtre 65224 de Edmund Optics (600 nm – FWHM 10 nm). La série d'images capturées par la caméra est envoyée sur le port RJ45 d'un ordinateur et visualisé grâce au logiciel PFV. Cette mesure vidéo est complétée par une mesure spectroscopique pour rechercher la présence d'argent, de carbone et de cuivre dans l'arc de rebond.

En parallèle de cette imagerie rapide, un PM 1P28 de la marque Hamamatsu Corporation a également été ajouté dans le but de détecter la présence de l'arc de rebond. En effet le PM est capable de détecter la lumière, avec une précision pouvant aller jusqu'au photon. Son signal est également très utile pour déterminer le moment d'apparition de l'arc et ainsi faciliter la recherche des images d'intérêt parmi toute la série d'images acquises. Le principe d'un PM est de transformer, avec typiquement un rendement quantique de 10 à 25 %, les photons en un signal électrique mesurable, comme l'illustre la Figure 3.26. Pour cela, les photons qui arrivent sur sa photocathode en entrée sont en partie convertis en électrons. Ces électrons sont ensuite accélérés grâce à une succession de tensions qui découlent d'une haute tension (1 kV dans notre cas, via l'alimentation PMT-HVPS 400224 de la marque Horiba) à l'intérieur d'une série de dynodes qui vont multiplier le nombre d'électrons jusqu'à obtenir un signal électrique mesurable sur la résistance connectée à l'anode. Le flux d'électrons en sortie représente une intensité de courant proportionnelle à la quantité de photons capturés en entrée. Pour mesurer cette intensité, nous utilisons une résistance de valeur réglable de 2 à 10 k Ω pour s'adapter à l'intensité lumineuse de l'arc de rebond et à la dynamique du signal optique.

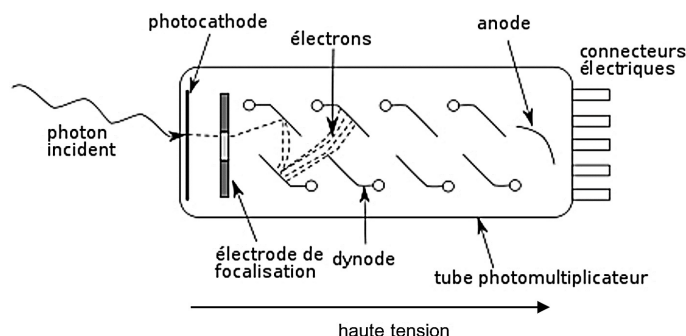


FIGURE 3.26 – Schéma du principe de fonctionnement d'un photomultiplicateur.

C'est finalement ce signal de tension qui est envoyé sur une carte d'acquisition USB-6251 BNC de la marque National Instruments, elle-même reliée par USB à l'ordinateur utilisé pour visualiser les images de la caméra rapide. Cette carte d'acquisition fait le lien avec la vidéo puisqu'elle permet d'afficher dans le logiciel PFV le graphique du signal de sortie du PM synchronisé image par image avec la vidéo, comme l'illustre la courbe bleu foncé sur la Figure 3.27. Le déclenchement de l'acquisition est paramétré dans le logiciel PFV. Il est réalisé sur front montant de l'intensité de courant, pour un seuil de 100 A, grâce à une mesure via la même sonde Rogowski que celle utilisée pour le premier gabarit, indépendamment de la mesure précise acquise grâce au shunt de courant. La sonde Rogowski permet en effet une mesure fidèle sur toute la phase ascendante de l'onde de courant, ce qui nous suffit pour le déclenchement. D'un point de vue facilité de câblage, la sortie BNC de la sonde Rogowski est également un avantage pour la connexion au port BNC d'entrée pour le déclenchement de la carte d'acquisition. La tension de sortie de la sonde Rogowski est visible sur la courbe rouge de la Figure 3.27.

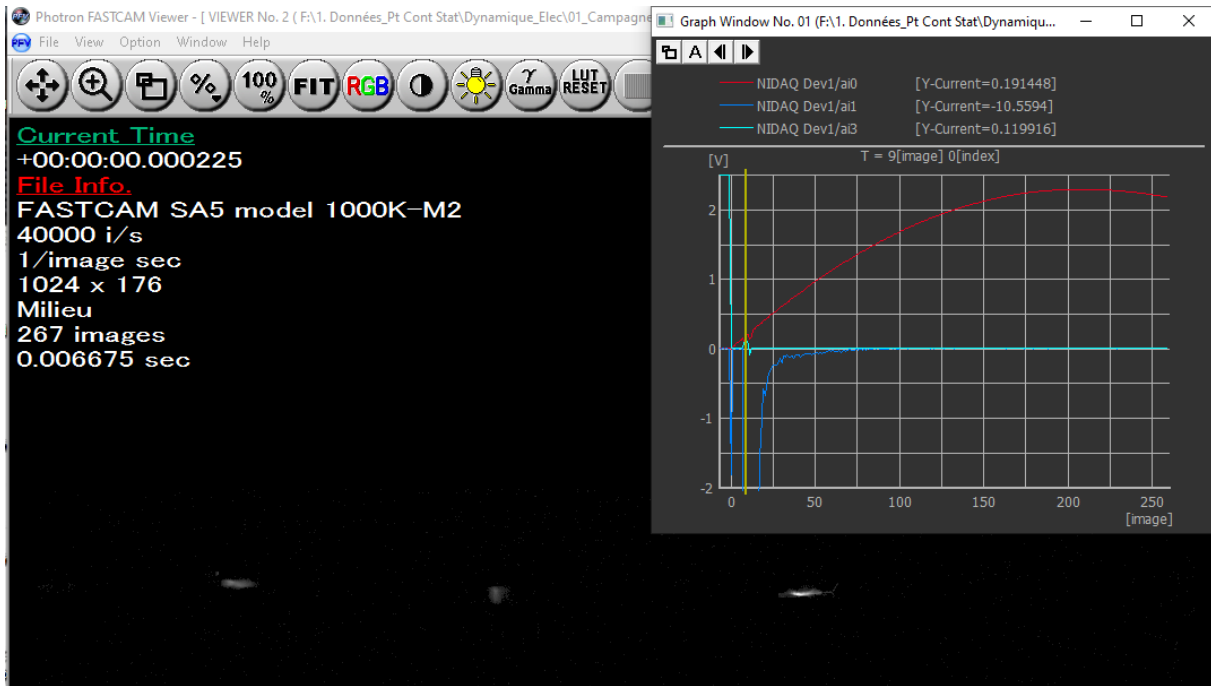


FIGURE 3.27 – Capture d’écran du logiciel PFV avec une image dédoublée prise pendant l’arc de rebond ainsi que les signaux de tension de contact en bleu clair, de tension de sortie du PM en bleu foncé et d’intensité du courant d’arc en rouge. Sur l’image dédoublée prise au moment du rebond, nous voyons à gauche l’arc avec le filtre d’*Ag* et à droite l’arc avec le filtre *C*.

Comme expliqué dans le paragraphe précédent sur les diagnostics électriques, la tension de contact est mesurée précisément grâce à une sonde différentielle de calibre $\times 1$ équipé d’un écrêteur pour la protéger de la tension de charge des condensateurs et de la tension de l’arc de rebond. Pour vérifier la tension de charge des condensateurs avant le début de la décharge, et surtout pour avoir une mesure de la tension d’arc, nous avons branché une deuxième sonde différentielle, la DP 40 LV de la marque Pintek, mais cette fois sur le calibre $\times 100$. L’avantage de ce calibre est de pouvoir mesurer des tensions élevées jusqu’à 650 V avec une bande passante de 0 à 40 MHz. Cependant la précision de la mesure affichée à $\pm 2\%$ sur la documentation constructeur est réduite du fait de l’atténuation en tension. En effet une tension de l’arc de 12 V (exemple de la Figure 3.27) donnera un signal atténué à 120 mV qui sera très bruité du fait des perturbations électromagnétiques inhérentes à une salle de test en laboratoire.

Spectroscopie

Pour analyser les espèces présentes dans l’arc de rebond, et notamment y détecter la présence de cuivre, nous avons utilisé le spectromètre HR2000CG de la marque Ocean Optics. Il permet de mesurer la lumière d’une gamme de longueurs d’ondes allant de 200 à 1050 nm avec une résolution spectrale à 0.62 nm. Le logiciel constructeur OceanView sert ensuite d’interface avec l’utilisateur. Nous choisissons la détection automatique sur front montant, avec une intégration du signal lumineux émis par l’arc de 20 ms, ce qui nous permet d’être sûr de bien couvrir l’ensemble du phénomène d’émission lumineuse de l’arc de rebond. À la fin de chaque essai, nous obtenons un spectre où nous cherchons à distinguer les raies caractéristiques des éléments présents dans l’arc de rebond.

3.2.6 Analyse des surfaces de contact

Pour l'analyse des surfaces de contact après essai sur le gabarit « contact électrique dynamique », nous nous calquons sur le protocole d'observation réalisé pour les échantillons après essai sur le premier gabarit en nous concentrant sur les contacts fixes qui présentent l'avantage d'avoir une surface de départ relativement plane comparée à celle du contact mobile. Nous utilisons les équipements présents au laboratoire GREMI d'Orléans :

- La loupe binoculaire pour la vue d'ensemble et le repérage de la zone de contact ;
- Le microscope optique numérique pour la profilométrie (images en 3D) et les mesures d'aires des surfaces de contact (images en 2D) ;
- Le MEB couplé à l'EDX pour l'analyse plus fine de la structure et de la composition chimique surfaciques.

3.3 Conclusion

L'objectif de ce travail de thèse est l'étude des phénomènes de collage se produisant sur le contact électrique présent dans la chambre de coupure des produits de protection. Pour cette étude, deux gabarits expérimentaux ont été mis en place, l'un pour l'étude du collage statique et l'autre pour l'étude du collage dynamique. Ce chapitre nous en a donné leur description ainsi que le détail de l'ensemble des outils de diagnostics utilisés. Les résultats expérimentaux issus de ces deux gabarits vont nous permettre de valider la théorie sur le comportement du contact électrique que nous avons vu aux chapitres 1 et 2. Ils seront également comparés à deux types de modèles, un modèle par analogie et un modèle multiphysique. Nous décrirons dans les chapitres suivants les résultats expérimentaux ainsi que les résultats de simulation qui viendront les compléter.

Chapitre 4

Étude du collage statique

Dans le chapitre 1, nous avons défini l'origine du collage comme étant un échauffement très important, menant à la fusion des matériaux constituant le contact. Deux types de collage peuvent se produire en fonction de la cause de cet échauffement : le collage statique dû à la constriction des lignes de courant au passage du contact, et le collage dynamique à la suite de la présence d'un arc électrique.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser les échauffements menant au collage statique afin de trouver les paramètres limites permettant d'éviter la fusion des matériaux de contact. Notre démarche sera progressive, en analysant d'abord les phénomènes d'échauffement dans un contact statique à surface constante, puis dans un contact plus complexe avec une surface qui évolue au fil de l'essai.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons tout d'abord à l'étude de l'échauffement se produisant dans un contact statique à surface constante. Nous présenterons ainsi les résultats obtenus pour une constriction dans une barre de cuivre, puis ceux obtenus avec les électrodes du disjoncteur modulaire préalablement soudées par le passage d'un fort courant. Nous comparerons ces résultats expérimentaux à des résultats de simulation multiphysique. Une fois les phénomènes physiques décrits pour les échauffements dans un contact statique à surface constante, nous présenterons les résultats expérimentaux des échauffements se produisant dans un contact statique dont la surface de contact évolue durant l'essai. Nous ferons varier deux paramètres expérimentaux : l'intensité crête de l'onde de courant et la force de contact statique réglée avant le début de l'essai. Nous verrons alors de quelle manière ces deux paramètres influent sur l'échauffement du contact statique, et quelles en sont les valeurs limites permettant d'éviter la fusion, et donc le potentiel collage du contact. Les interprétations de ces résultats expérimentaux seront également complétées grâce aux résultats de simulation numérique provenant d'un modèle simplifié. L'utilisation de ce deuxième modèle est intéressante car, par son couplage mécanique, il permet de prendre en compte l'évolution de la surface de contact avec la température.

4.1 Échauffement dans un contact statique à surface constante

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'échauffement dans un contact statique à surface constante. Dans le chapitre 1, nous avons présenté ce type d'essai comme un essai en comportement 2, avec une surface de contact constante à la suite d'un premier essai menant au collage du contact. Ici, avant de reproduire cette configuration avec des électrodes soudées, nous avons choisi de reconstituer de façon maîtrisée un contact à surface constante en créant une constriction dans une barre de cuivre massif. Le but est ici de valider expérimentalement la formule de Holm (1.10).

4.1.1 Constriction dans une barre calibrée

Prototype utilisé

Pour réaliser le prototype utilisé dans ce travail de thèse, nous avons demandé au service de prototypage de l'entreprise Hager d'éroder, par découpe fil, une barre de cuivre de 3 mm de diamètre. Du fait de la technique de découpe fil, la constriction obtenue est en forme de quadrilatère. Les valeurs souhaitées pour la constriction étaient un angle de 45 ° entre la face érodée et le plan contenant la surface de la constriction, et dans la mesure du possible une surface de constriction de forme carrée de côté $c=200\text{ }\mu\text{m}$. Les représentations 3D et 2D du prototype demandé sont illustrées à la Figure 4.1.

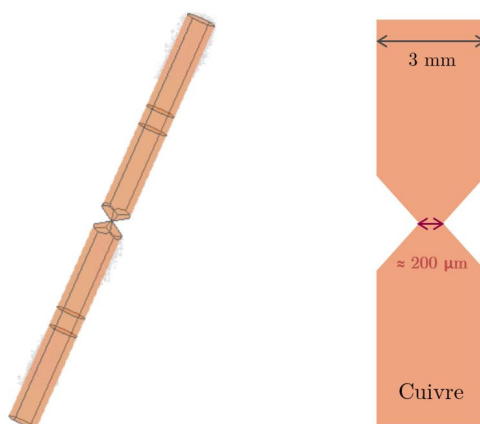


FIGURE 4.1 – Représentations schématiques en 3D (à gauche) et en 2D (à droite) du prototype demandé pour reproduire un contact à surface constante.

L'avantage de ce prototype est d'avoir une constriction dans un matériau massif, sans présence de film résistif comme ce pourrait être le cas lors de la mise en contact de deux électrodes. L'étude du phénomène d'échauffement est ainsi plus abordable car la résistance du rétrécissement est uniquement due à la constriction des lignes de courant. D'un point de vue pratique, ce prototype reste néanmoins très fragile dans sa zone de rétrécissement et il peut rompre sous le poids des deux extrémités. Il faut donc le maintenir avec des supports en plastique qui empêchent la prise de potentiel sur environ

10 mm de part et d'autre du rétrécissement.

Avant d'effectuer les essais, nous avons d'abord visualisé au microscope optique numérique la constriction sur chacun des quatre côtés afin de caractériser la géométrie de cette constriction. Un exemple de photographies obtenues pour un même côté du « contact » est donné à la Figure 4.2 et à la Figure 4.3.

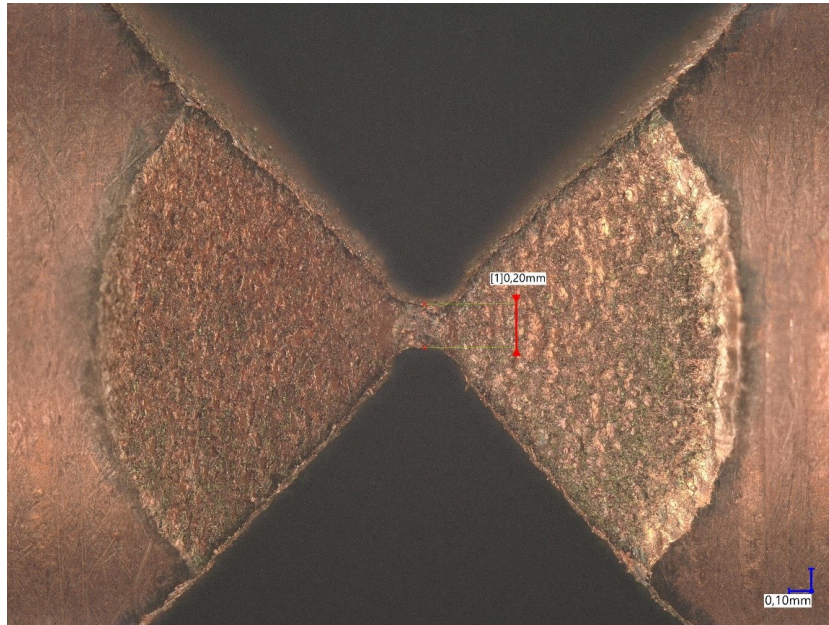


FIGURE 4.2 – Photographie du rétrécissement visualisé au microscope optique (grandissement x80), et montrant clairement la trace d'usinage.

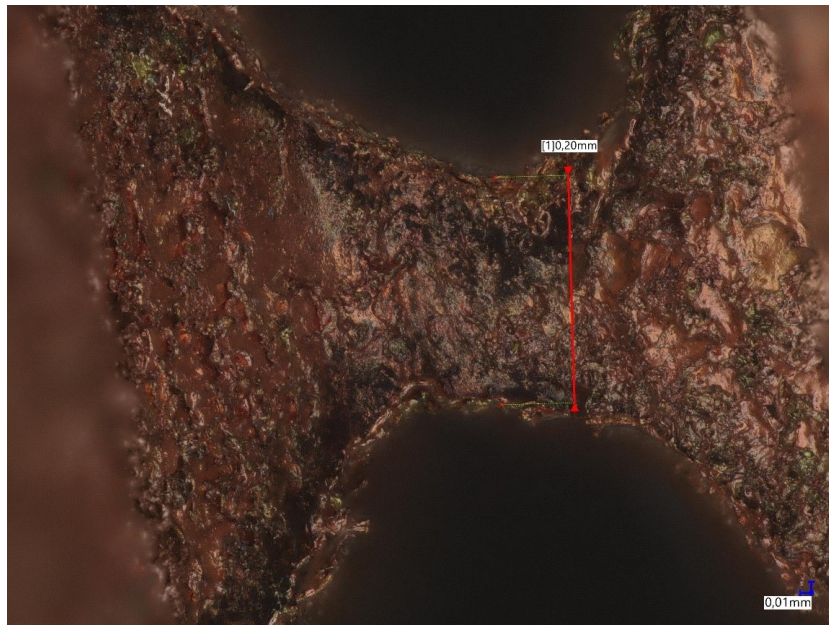


FIGURE 4.3 – Zoom sur le rétrécissement du prototype. Visualisation au microscope optique (grandissement x400).

Sur cet exemple, nous pouvons observer que la géométrie demandée n'a pas pu être totalement respectée. En effet, le diamètre du fil de découpe impose une sorte de pont entre

les deux côtés de la barre de cuivre, d'une longueur de l'ordre de 120 μm . De plus, l'angle entre les faces érodées et le plan contenant la surface de la constriction est plutôt de 47 °. La surface de contact mesurée est considérée comme rectangulaire de côté A=240 μm et B=200 μm . Si nous reprenons la notion de rayon équivalent à cette surface, nous obtenons :

$$R_{equ} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 240}{\pi}} = 124 \mu m$$

Méthode de mesure

Pour cet essai, nous faisons passer une onde de courant à partir du banc de court-circuit décrit dans le chapitre précédent. Les mesures de courant et de tension se font respectivement avec la sonde de courant Rogowski et avec la sonde de tension passive également décrites dans le chapitre précédent.

Ici, la mesure de tension ne peut pas se faire sur des parties de conducteur non traversées par le courant à cause de la géométrie cylindrique du prototype. De plus, les supports en plastique qui soutiennent le rétrécissement nous empêchent la prise de potentiel sur environ 10 mm de chaque côté. Nous incluons donc un certain volume de part et d'autre de la constriction, ce qui ajoute une tension due à la résistivité du matériau.

Résultats expérimentaux

Pour étudier les échauffements au passage du courant dans le dispositif présenté dans le paragraphe précédent, nous avons fait passer un courant d'intensité maximale I_0 croissante : 630 A, 700 A et 750 A. Les caractéristiques UI correspondantes sont illustrées sur le graphique de la Figure 4.4.

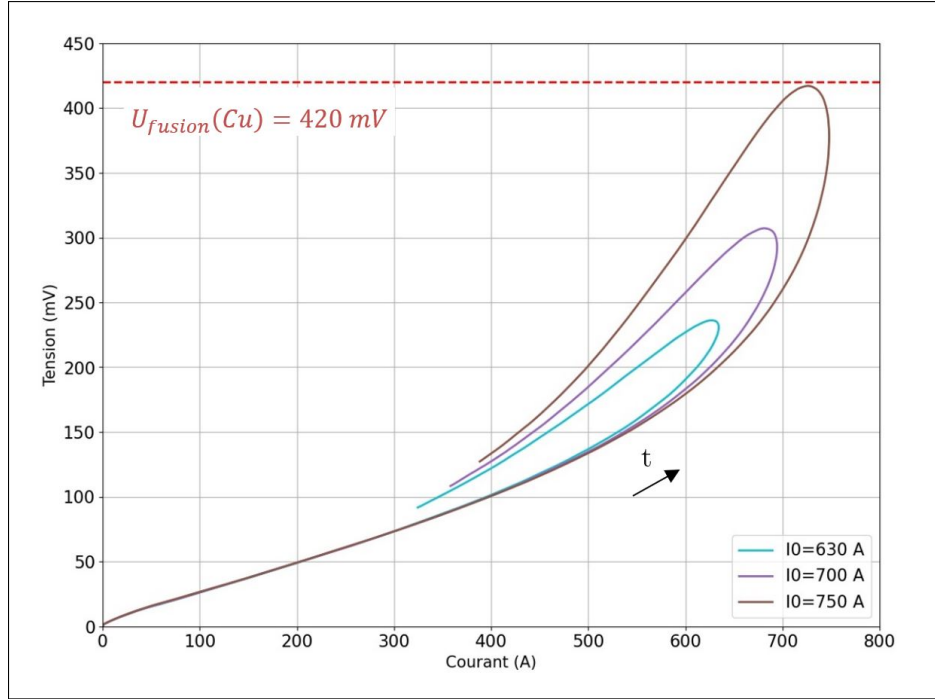


FIGURE 4.4 – Caractéristiques UI pour un courant d'intensité croissante passant par le rétrécissement du prototype en cuivre. Pour alléger le graphique, la fin des cycles UI n'a pas été tracée.

Puisque la surface du rétrécissement est ici faite à partir d'un matériau massif, nous pouvons faire l'hypothèse que cette surface reste constante lors des trois essais présentés. Pour de faibles intensités de courant, le début des courbes est superposé jusqu'à environ 300 A, avec une pente constante qui traduit une résistance de contact stable dans cette zone où il y a peu d'échauffements : la tension de 75 mV correspond à une température de contact d'environ 105 °C selon la formule de Kohlrausch. Cette superposition du début des cycles UI est cohérente avec la théorie puisque d'une courbe à l'autre, ni les caractéristiques matériaux ni la géométrie de contact ne sont modifiées. Puis au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité, les échauffements augmentent, les courbes s'infléchissent et la résistance du rétrécissement augmente à cause de l'augmentation de la résistivité du matériau avec la température. Le dernier cycle UI , ayant pour intensité crête $I_0=750$ A, est proche de la tension de fusion du cuivre (417 mV < 420 mV). Les courbes UI reviennent ensuite à l'origine du graphique en décrivant un cycle caractéristique de l'inertie thermique du matériau cuivre.

Nous notons que la largeur des cycles est de plus en plus importante avec l'augmentation de l'intensité crête I_0 . Ceci est dû à la chaleur générée qui est de plus en plus élevée, comme nous l'expliquerons plus tard lors de l'analyse des courbes de la Figure 4.6.

Avec ces essais, nous retrouvons parfaitement la forme des cycles de comportement 2 détaillés dans la Figure 2.5 du chapitre 2. Pour ce qui est de la formule de Holm (1.10), si nous l'appliquons avec la résistivité du cuivre à température ambiante et la résistance de contact prise à l'origine des courbes UI , nous obtenons un rayon de contact d'environ 34 μm . Ce résultat est très inférieur au rayon équivalent mesuré au microscope optique

($R_{equ} = 124 \mu m$), ce qui ne nous permet pas de valider la formule de Holm dans nos conditions expérimentales. Nous pouvons expliquer cette différence en faisant l'hypothèse que le pont imposé par le fil de découpe au milieu de la constriction ajoute une résistance en supplément de la résistance de contact décrite par Holm dans le cas d'un simple rétrécissement. Sans ce pont, la résistance de contact mesurée à l'origine des courbes UI serait réduite, ce qui augmenterait le rayon de contact calculé.

4.1.2 Constriction dans un contact soudé

Nous cherchons maintenant à étudier la réaction d'échauffement de manière plus réaliste, avec le contact de coupure du disjoncteur modulaire, dans la configuration particulière d'une surface de contact stable durant l'essai électrique. Pour cela, nous devons souder les électrodes l'une à l'autre lors d'un essai préalable. Nous allons d'abord détailler le protocole de nettoyage et de test permettant l'obtention des contacts soudés, puis nous présenterons les résultats obtenus.

Obtention des contacts soudés

Pour obtenir les contacts préalablement soudés, nous utilisons le gabarit « contact électrique statique » décrit dans le chapitre 3. Le but ici est de maintenir les électrodes du disjoncteur modulaire en contact avec une force de contact statique F_c pré-établie avant l'essai, puis de faire passer une première décharge de courant d'une intensité crête I_0 donnée pour atteindre la fusion des matériaux. Comme nous allons le préciser dans la suite de cette partie, cette fusion pourra être globale ou bien sous forme de micro-fusions (respectivement les zones 4 et 3 de la Figure 2.6 du chapitre 2). Dans cette partie, cette première décharge peut être qualifiée d'essai préliminaire. La deuxième décharge, réalisée pour le même couple (F_c, I_0) correspond ici à notre essai d'intérêt, avec une surface de contact constante pendant l'essai.

Pour vérifier si la surface de contact reste stable pendant la deuxième décharge électrique, nous avons pris l'exemple d'une décharge de courant d'intensité crête $I_0=2$ kA. Nous avons testé trois lots de cinq paires d'électrodes comparables :

- Le lot A où les électrodes sont mises en contact avec une force $F_c=6$ N. Aucun essai électrique n'est réalisé sur ces contacts ;
- Le lot B qui après une mise en contact à $F_c=6$ N subit une décharge de courant d'intensité crête $I_0=2$ kA ;
- Le lot C qui après une mise en contact à $F_c=6$ N subit deux décharges de courant à $I_0=2$ kA, sans séparation des électrodes entre les deux décharges.

La Figure 4.5 présente les rayons de contact équivalents calculés à partir des mesures de surfaces de contact. Pour les électrodes du lot A, mises en contact sans décharge électrique, nous obtenons un rayon équivalent moyen de $146 \mu m$ pour l'électrode en AgC et de $158 \mu m$ pour l'électrode en cuivre revêtu d'argent. Ces rayons correspondent uniquement à une déformation mécanique des surfaces de contact, avec un écrasement

des aspérités présentes en surface. Après une première décharge, le rayon équivalent moyen des électrodes de contact du lot B augmente considérablement aux alentours de 225 μm . Les rayons équivalents du lot C, qui a subi deux décharges, sont similaires à ceux mesurés après une seule décharge. Grâce à cette expérience, nous pouvons affirmer que le rayon de contact reste stable durant la deuxième décharge de courant, à condition de ne pas séparer les électrodes entre les deux décharges.

Comme la surface de contact où passe le courant est commune aux deux électrodes, nous pourrions nous attendre à avoir des rayons équivalents moyens identiques pour les deux électrodes. Les légères différences sont dues aux incertitudes sur les mesures de surfaces de contact, surtout pour les mesures du lot A qui ne subissent qu'une mise en contact, comme nous pouvons le voir avec les barres d'erreur sur la Figure 4.5. Pour les lots B et C ayant subi une ou deux décharges, le passage du courant marque plus profondément la morphologie de surface des électrodes, avec une surface plus foncée lorsqu'elle est observée au microscope optique. Ce contraste permet ainsi une mesure plus précise pour les lots B et C que pour le lot A.

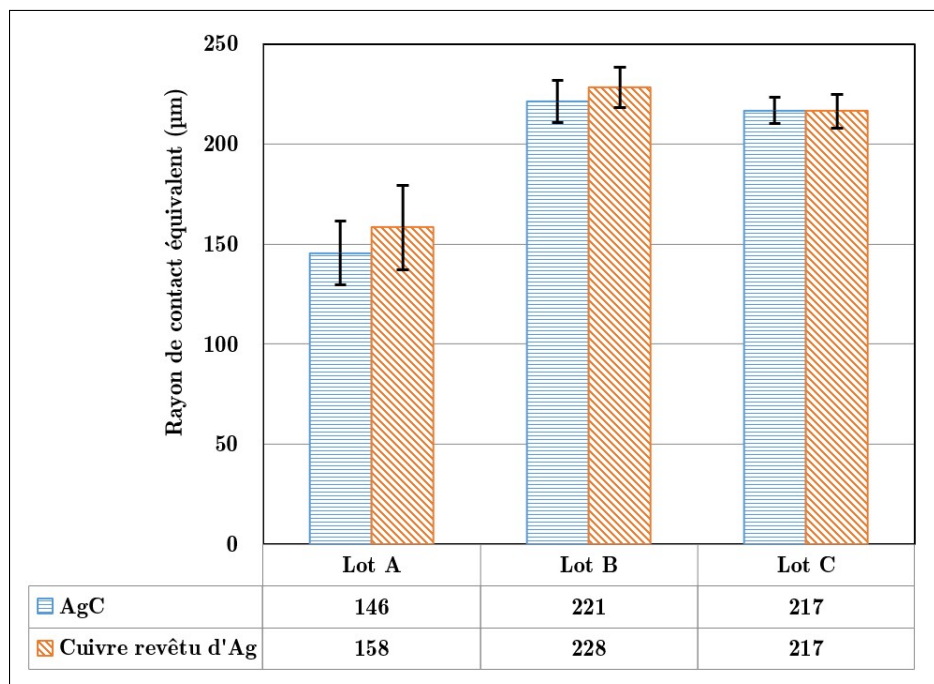


FIGURE 4.5 – Rayons de contact équivalents calculés à partir des surfaces de contact mesurées après trois configurations différentes : électrodes mises en contact sans décharge de courant, après une décharge à $I_0=2$ kA et après deux décharges à $I_0=2$ kA (sans séparation entre les deux décharges). Les barres d'erreur correspondent à $\pm$ l'écart-type sur les cinq valeurs mesurées.

Nous avons également complété cette mesure de surface par une visualisation au MEB et une analyse EDX pour un échantillon de chaque lot afin de caractériser plus finement l'état de surface de ces échantillons. Le Tableau 4 compare les surfaces de contact observées au MEB à un grandissement x150. Nous avons ici utilisé le détecteur In-Lens afin de mettre en avant la morphologie de surface des électrodes.

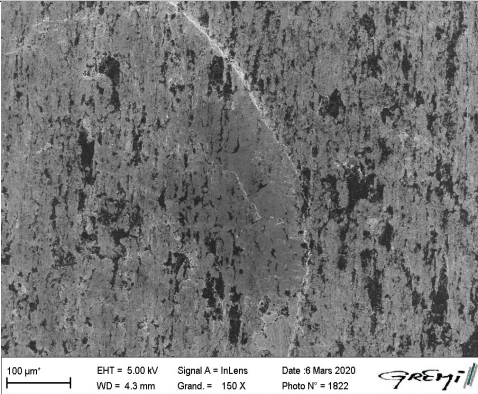
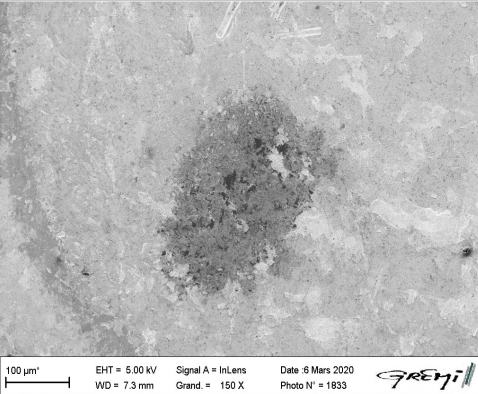
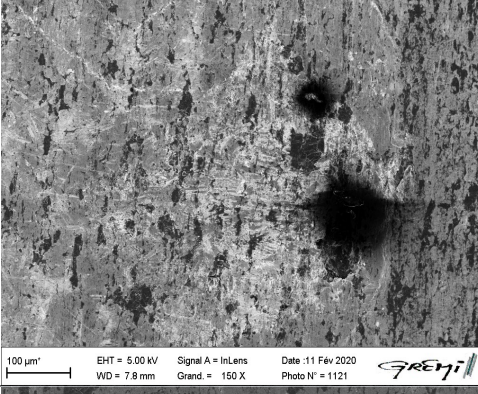
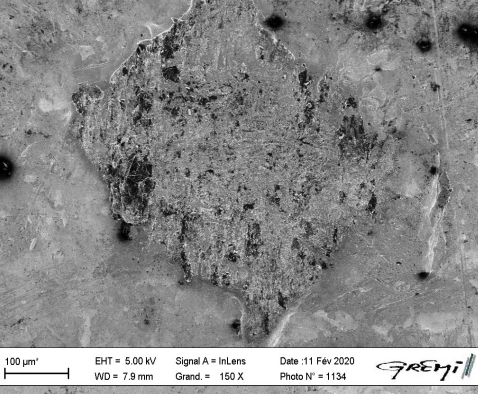
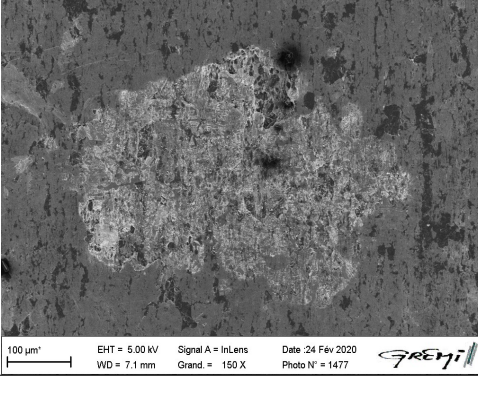
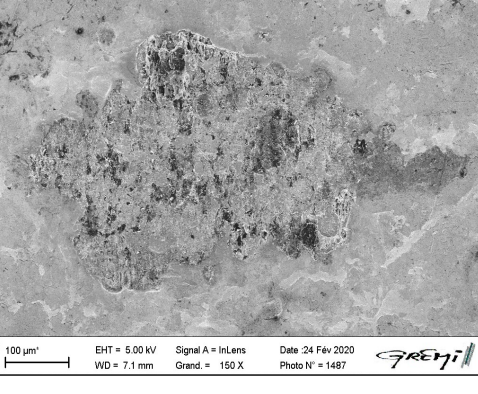
Configuration	AgC	Cuivre revêtu d'Ag
Lot A (après mise en contact)		
Lot B (après une décharge)		
Lot C (après deux décharges)		

TABLE 4.1 – Observations d'un échantillon caractéristique de chaque lot au MEB. Les images sont obtenues avec le détecteur In-Lens à un grandissement x150.

Dans le Tableau 4, nous observons qu'après la mise en contact mécanique du lot A, la surface de la zone de contact est modifiée par rapport au reste de la surface d'AgC. Dans cette zone, la surface est aplatie et la géométrie des stries de graphite est modifiée. La surface correspondante est également déformée sur l'autre électrode en cuivre revêtu d'argent. Cette déformation est confirmée par la zone plus sombre, synonyme de changement morphologique avec le détecteur In-Lens utilisé. Pour les lots B et C ayant subi respectivement une et deux décharges électriques, les surfaces de contact observées sont assez similaires. Elles sont toutes plus grandes que celle du lot A sans décharge de courant, ce qui confirme les résultats de mesure du graphique de la Figure 4.5. À plus fort grandissement et en analysant les surfaces à l'EDX, nous y avons également observé des signes de fusion des matériaux de contact, tout comme cela était le cas pour une onde à $I_0=2800$ A dont la Figure 3.16 et la Figure 3.17 sont

les illustrations : projection de gouttelettes métalliques fondues puis solidifiées, alliage d'argent et de cuivre alors que ces deux matériaux sont distincts au début de l'essai.

Nous venons ici de montrer que pour une intensité $I_0=2$ kA, la surface de contact reste stable si nous nous référons aux mesures en microscopie optique. Néanmoins les mesures optiques peuvent être remises en question, surtout pour des courants plus faibles que le courant à $I_0=2$ kA où le faible contraste de la zone de contact empêche de discerner précisément ses contours. De plus, nous n'avons pas vérifié optiquement que le rayon de contact reste stable pour d'autres intensités de courant. Afin de valider de manière plus globale cette hypothèse de rayon constant pendant nos essais après une première décharge permettant le collage préliminaire du contact, nous nous appuyerons sur les cycles UI en comportement 2 obtenus expérimentalement lors de la deuxième décharge, ainsi que sur des résultats de simulation qui coïncident avec ces caractéristiques UI expérimentales.

Résultats expérimentaux

Une fois validé le protocole de test pour obtenir des contacts soudés, nous avons testés quatre lots de cinq échantillons, chaque lot subissant deux décharges d'intensité crête I_0 croissante : $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A, $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A. La force de contact statique F_c est fixée à 6 N. Cette force correspond à la force typique à l'intérieur des disjoncteurs modulaires étudiés dans ce travail de thèse. Les résultats sont présentés dans le graphique de la Figure 4.6. Sur cette figure et par souci de clarté, seule une courbe typique a été choisie parmi les cinq obtenues pour chaque intensité crête I_0 . Le graphique complet comprenant toutes les courbes enregistrées est joint en Annexe A. Le début de chacune des courbes UI n'est volontairement pas représenté car le signal de tension est perturbé par le bruit électromagnétique au début de la décharge. Cette perturbation induit un saut de tension à l'origine des courbes, qui a tendance à augmenter avec l'augmentation du di/dt du courant. Le signal de tension pour les courbes à $I_0=2800$ A est ainsi le plus perturbé avec une tension qui démarre à 10 mV. Nous vérifions facilement que nous obtenons le même type de courbes que sur la Figure 4.4. Le fait qu'elles ne soient pas confondues, notamment dans la première partie ascendante, prouve que le rayon de contact est différent pour chacune des intensités testées.

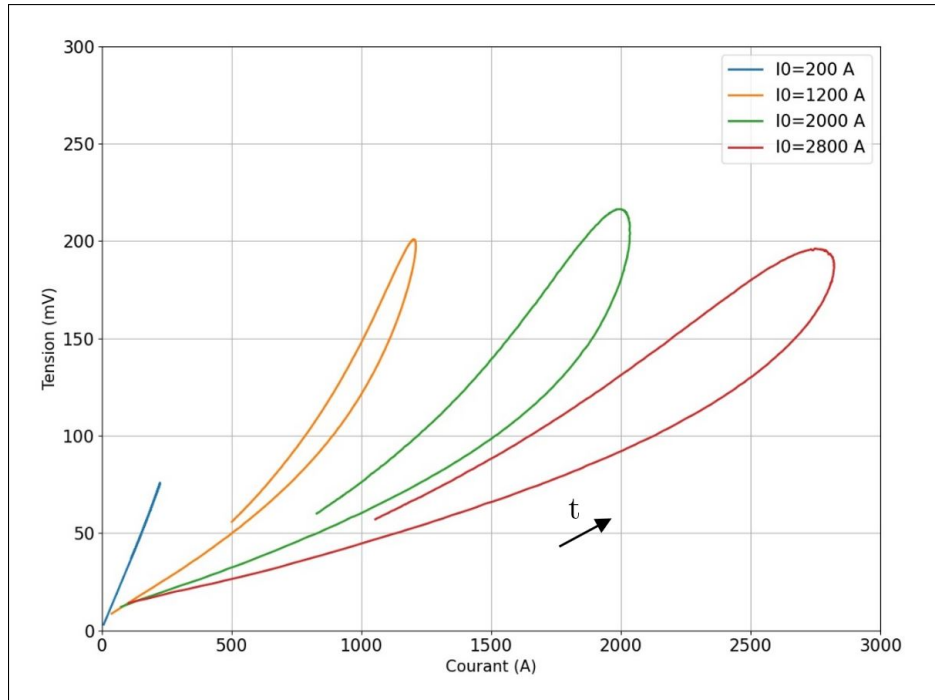


FIGURE 4.6 – Courbes UI caractéristiques obtenues pour des contacts préalablement soudés pour des intensités crêtes I_0 croissantes. Dans un souci de clarté et pour chaque intensité crête I_0 testée, seule une courbe UI caractéristique est présentée ici. Le graphique complet comprenant toutes les courbes obtenues est présenté en Annexe A.

Après avoir vu passer les deux décharges de courant identiques, les surfaces de contact de chaque échantillon ont été analysées par microscopie optique et électronique en suivant les étapes décrites dans le chapitre 3. Le graphique de la Figure 4.7 présente les rayons de contact équivalents calculés à partir des surfaces de contact mesurées après deux décharges de courant identiques d'intensité crête I_0 croissante. Sur ce graphique, les rayons mesurés pour une mise en contact à $F_c=6$ N sans décharge de courant sont représentés à une intensité de courant nulle, i.e. $I_0=0$ A. Ils correspondent aux échantillons du lot A de la Figure 4.5.

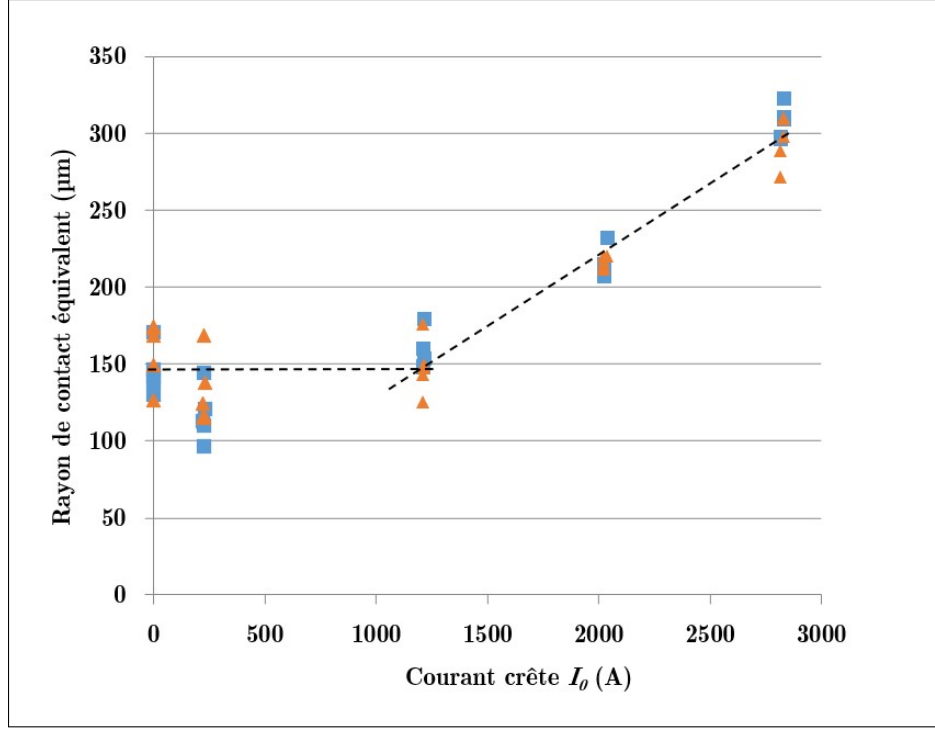


FIGURE 4.7 – Rayons de contact équivalents calculés à partir des surfaces de contact mesurées après deux décharges successives de courant pour une intensité crête de courant I_0 croissante. Les carrés bleus représentent les rayons des électrodes d'AgC et les triangles oranges ceux des électrodes de cuivre revêtu d'Ag. Les pourcentages d'erreur relative sont de 12 %, 15 %, 10 %, 3 % et 4 % pour respectivement $I_0=0$ A, $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A, $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A.

Observons maintenant en parallèle les résultats présentés dans la Figure 4.6 et dans la Figure 4.7. Pour l'essai à $I_0=200$ A, la caractéristique UI est une droite où la tension de contact pendant la montée en courant se superpose parfaitement avec la tension pendant la descente du courant. Le rayon de contact, qui était d'environ 150 μm pour une mise en contact sans décharge, reste ici stable aux erreurs de mesure près malgré les deux passages de courant. Si nous nous référons à la Figure 2.6 du chapitre 2, nous sommes donc ici dans la zone réversible. Comme les échauffements sont faibles, la surface de contact n'évolue pas pendant le passage du courant dans le contact. La caractéristiques UI est donc une droite, que ce soit pour la première ou pour la deuxième décharge. Il est à noter que bien que la surface n'évolue pas pendant la deuxième décharge, nous ne pouvons donc pas dire ici que la surface de contact est soudée à la fin de la première décharge, puisque c'est le faible niveau d'intensité de courant qui garantit la stabilité du rayon de contact.

Pour l'intensité crête $I_0=200$ A, nous pouvons chercher à calculer le rayon de contact à partir de la formule de Holm et de la résistance de contact mesurée au début de l'essai, lorsque la température du contact est assez faible. Pour une température de contact de 20 °C, nous obtenons un rayon $a = 21 \mu\text{m}$ pour l'Ag, ce qui est très inférieur au rayon équivalent mesuré ($a = 150 \mu\text{m}$). Nous verrons dans la partie modélisation que c'est bien la valeur de rayon mesurée par microscopie optique qui est surestimée, à cause d'un manque de contraste qui rend difficilement discernables les contours de la surface de contact pour l'intensité $I_0=200$ A.

Pour les autres essais à $I_0=1200$ A, $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A, les caractéristiques UI forment cette fois un cycle qui est typique des cycles de comportement 2 qui ont été décrits dans la Figure 2.5 du chapitre 2. En effet, après une phase linéaire au début de ces cycles, les courbes s'incurvent lorsque la température du contact devient suffisamment élevée pour faire augmenter la résistivité des matériaux en contact. Pour une intensité de courant donnée, les tensions de contact sont plus élevées à la fin qu'au début de l'essai. Ceci est dû à l'inertie thermique des matériaux de contact. De plus, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2, le courant limite de refusion du contact n'est pas atteint. À partir d'une figure de l'ouvrage de Féchant [12], nous avons estimé graphiquement l'intensité crête I_0 à environ 4600 A pour qu'un contact en argent soudé de rayon $a=250$ μm atteigne la refusion avec une onde de courant arrivant à son intensité maximum en 5 ms (50 Hz).

Sur cette Figure 4.6, nous avons vu que les courbes obtenues pour une deuxième décharge sont typiques d'un comportement 2 pour des valeurs d'intensité crête à partir de $I_0=1200$ A, ce qui est caractéristique d'un rayon stable durant l'essai. De plus si nous regardons les rayons de contact équivalents pour ces trois intensités crête, nous pouvons voir qu'ils augmentent par rapport au rayon équivalent provoqué par l'unique mise en contact mécanique, et ce de façon linéaire par rapport à l'intensité crête. Nous pouvons donc en conclure que la première décharge fait augmenter la surface de contact, proportionnellement à l'intensité crête de la décharge de courant, et même pour ces trois intensités crête à des collages locaux ou à une soudure globale. Nous pouvons donc confirmer l'hypothèse faite à la section précédente : dans le cadre des intensités crête testées, pour $I_0>1200$ A, la surface est soudée après la première décharge et le rayon de contact reste constant durant la deuxième décharge.

Intéressons-nous maintenant à la largeur des cycles de la Figure 4.6 et à leur tension de contact maximum U_{max} . Nous nous référons pour cela aux informations tirées de la littérature dans le chapitre 2 à la Figure 2.5. Le graphique de cette figure représente également les cycles UI obtenus pour des décharges d'intensité crête croissante, mais cette fois avec le même rayon de contact à chaque début d'essai, ce qui n'est pas le cas dans nos travaux puisque le rayon équivalent de contact augmente avec l'intensité crête du courant de décharge. Nous pouvons tout de même nous servir des explications trouvées dans la bibliographie et les confronter à nos observations expérimentales afin de mieux interpréter les cycles UI en comportement 2. Prenons d'une part la largeur des cycles. D'après l'article de Walczuk [35], elle dépend de l'intensité crête I_0 , du rayon de contact au début de la deuxième décharge et des propriétés des matériaux en contact :

- Pour observer uniquement l'influence de l'intensité crête I_0 , nous pouvons reprendre la Figure 2.5 où les cycles sont obtenus pour un même contact en *Ag* avec un rayon de contact constant. L'augmentation de I_0 élargit les cycles UI . En effet pour un même couple (rayon de contact, caractéristiques matériaux), l'augmentation de I_0 occasionne un échauffement plus important du contact. Nous pouvons alors faire l'hypothèse que pour évacuer cette chaleur supplémentaire par conduction, et étant

donné que la capacité thermique est identique pour chaque essai, la descente en température est ralentie, et le cycle UI s'élargit.

- Pour connaître l'influence du rayon de contact, pour une intensité crête et des caractéristiques matériaux identiques, nous observons en Annexe A les mesures UI de l'ensemble des échantillons testés. Nous étudions ici les résultats électriques obtenus pour cinq échantillons différents, mais nous considérons que les caractéristiques matériaux inter échantillons sont similaires à l'intérieur de ce lot de fabrication. Prenons l'exemple des courbes pour $I_0=2800$ A. Chacun des cinq échantillons a subi une première décharge de même intensité. Cependant la résistance à l'origine des courbes UI n'est pas tout à fait la même pendant la deuxième décharge, ce qui témoigne d'un rayon de contact légèrement différent. Plus la résistance à l'origine est élevée, plus le rayon de contact est faible. Or nous voyons clairement que pour $I_0=2800$ A, plus la résistance à l'origine est grande, plus le cycle est large. Cette observation peut également être faite pour les cycles à $I_0=1200$ A et $I_0=2000$ A. Dans le même principe que pour l'augmentation de I_0 , nous pouvons ici faire l'hypothèse que la diminution du rayon de contact entraîne un échauffement plus important, et donc un cycle UI plus large étant donné les caractéristiques matériaux identiques d'un essai à l'autre.
- En ce qui concerne l'influence des propriétés des matériaux de contact, nous ne pouvons pas nous baser sur les figures précédentes car les matériaux de contact sont identiques d'un essai à l'autre. Nous pouvons cependant interpréter de manière plus théorique l'influence des caractéristiques des matériaux. En effet une résistivité électrique plus élevée augmente les échauffements du contact, ce qui ralentit la descente en température pour une capacité thermique identique. La capacité thermique du matériau est une caractéristique dont la valeur définit l'énergie thermique nécessaire pour faire augmenter la température du matériau d'un degré. Lors de la phase d'échauffement du contact, plus elle est grande, plus la quantité de chaleur « emmagasinée » par le contact est importante, et donc plus la descente en température se fera lentement, ce qui élargit également les cycles UI .

D'autre part, la tension maximum U_{max} atteinte par les cycles UI a tendance à augmenter pour les intensités crêtes $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A et $I_0=2000$ A sur la figure de l'Annexe A, puis elle stagne voire diminue légèrement pour $I_0=2800$ A, ce qui traduit une température maximum qui n'augmente plus si nous nous référons à la formule de Kohlrausch présentée au chapitre 2. Cette stagnation ou diminution de U_{max} est le résultat de deux phénomènes antagonistes. Lorsque l'intensité crête I_0 augmente, les échauffements sont plus importants, et donc U_{max} augmente. Mais dans notre cas, le rayon de la surface de contact où passe le courant augmente d'une intensité crête à l'autre (cf Figure 4.7), ce qui réduit les échauffements et la tension U_{max} associée.

4.1.3 Simulation de l'essai statique en comportement 2

Après avoir analysé les résultats expérimentaux conduisant aux cycles UI de comportement 2, nous allons dans cette partie décrire et utiliser un modèle multiphysique. Ce

modèle s'appuie sur le logiciel COMSOL Multiphysics® et a pour objectif de déterminer le rayon de contact menant aux courbes UI expérimentales, dans une géométrie simplifiée, de comparer ces résultats aux rayons de la Figure 4.7 mesurés par microscopie optique, et de vérifier la pertinence de l'utilisation de la formule de Kohlrausch pour déterminer la température maximale du contact.

Présentation du modèle

Le logiciel COMSOL Multiphysics® [63] utilise le calcul par éléments finis pour simuler des phénomènes multi-physiques. Ici, nous simulons les échauffements par conduction lors du passage du courant en utilisant un couplage électrocinétique et thermique. Le schéma de la Figure 4.8 représente le principe de la simulation avec le problème d'électrocinétique et le problème thermique couplés.

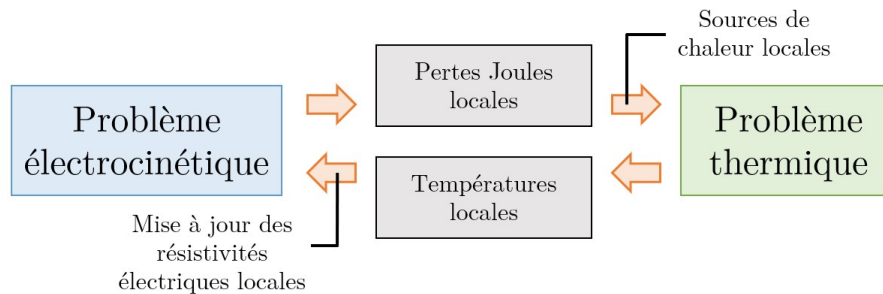


FIGURE 4.8 – Principe du couplage électrocinétique et thermique de la simulation.

Pour cela, nous utilisons les modules AC/DC et Heat Transfer de la suite logicielle COSMOL®. Il s'agit en fait de résoudre de façon couplée l'équation de conservation du courant et l'équation de la chaleur dans la géométrie de la Figure 4.9. Pour résoudre ces équations, nous devons également définir l'évolution des caractéristiques électriques et thermiques des matériaux utilisés dans la géométrie en fonction de la température. Les données entrées sont les mêmes que celles en Annexe B : résistivité électrique, conductivité thermique et capacité thermique de l' Ag et du Cu .

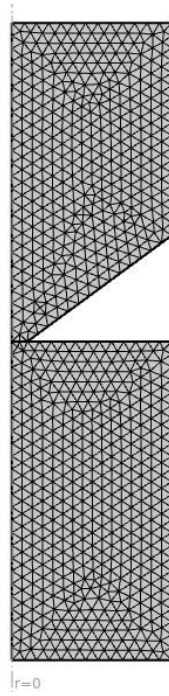


FIGURE 4.9 – Domaine de calcul et maillage typique du contact modélisé.

Le domaine de calcul et un maillage typique sont présentés sur la Figure 4.9. Le modèle est à symétrie de révolution axiale, et les électrodes ont un rayon de 1.5 mm. L'électrode du bas est en *Ag*, pour une hauteur de 3 mm. L'électrode du haut est en *Cu*. La partie cylindrique fait 2 mm de haut, et la partie conique 1 mm. L'angle du cône varie suivant la procédure décrite plus bas. Sur les bords du contact nous supposons une convection faible, mais cette condition limite n'a pas d'influence notable sur les résultats. Les extrémités sont considérées adiabatiques pour garder les mêmes conditions que pour le modèle par analogie présenté dans la section suivante. Un potentiel électrique nul est imposé à la base de l'électrode inférieure, et le courant imposé à l'entrée du contact (limite supérieure de l'électrode en cuivre) est le courant mesuré lors des expériences. Enfin, la température initiale de l'ensemble des matériaux est fixée à la température ambiante $T_0=20$ °C.

Procédure de calcul

Pour chacune des quatre ondes de courant expérimentales, nous avons fait varier l'angle du cône de l'électrode supérieure, autrement dit le rayon de la surface de contact, afin que les courbes *UI* expérimentales et issues du calcul coïncident au mieux. Ces caractéristiques *UI* sont présentées sur la Figure 4.10 Les rayons de la surface de contact sont présentés dans le Tableau 4.2 et comparés aux rayons déterminés expérimentalement sur la Figure 4.7

Intensité crête I_0 (A)	Rayon calculé (μm)	Rayon moyen mesuré (μm)
200	34,5	125
1200	145	153
2000	210	217
2800	290	302

TABLE 4.2 – Rayons de contact déduits de la simulation et rayons moyens mesurés expérimentalement.

Résultats

Les caractéristiques UI calculées et mesurées sont en bon accord. Comme le courant imposé dans la simulation est le courant expérimental, cela suppose que le calcul de la température dans le contact ainsi que le potentiel électrique sont correctement calculés. Les différences que nous notons entre le calcul et la mesure peuvent venir de la géométrie simplifiée utilisée pour le calcul, des propriétés des matériaux qui ne sont pas exactement les mêmes que les matériaux réels, ainsi qu'au fait que l'influence de la force de contact n'est pas prise en compte dans le calcul.

La Figure 4.11 montre un très bon accord entre les rayons de surface de contact calculés et mesurés, dès que l'intensité crête de l'onde de courant est supérieure à 1 kA environ. Pour des valeurs inférieures, la simulation donne une variation linéaire du rayon de contact avec l'intensité, contrairement aux mesures. Il faut rappeler que les mesures optiques s'appuient sur la visualisation de contraste lumineux sur les contacts. Ce contraste est d'autant plus difficile à identifier que l'intensité du courant est faible. Par ailleurs, le rayon minimum de contact, pour les faibles valeurs de l'intensité du courant, sera plutôt imposé par la contrainte mécanique du contact. Ainsi, il est difficile de conclure si le rayon minimal de contact apparaissant sur la Figure 4.11 est dû au fait de la contrainte mécanique ou au fait de la limite de détection optique lors des mesures. Il faudra cependant garder en mémoire que la mesure optique du rayon de contact que nous avons utilisée est susceptible de surestimer ce rayon pour les faibles valeurs du courant.

De plus, compte-tenu de l'approche théorique sur le contact exposée au chapitre 1, il peut y avoir une différence entre la surface de contact apparente et la surface de contact réelle c'est-à-dire celle qui voit passer le courant. Plus l'intensité de courant est importante, plus la différence entre ces deux surfaces sera faible. Sur la Figure 4.11, étant donnée la méthode optique de mesure, nous pouvons raisonnablement penser que la mesure optique nous donne la taille de la surface apparente de contact. Les résultats de la simulation sont logiquement la surface de passage du courant. Dans ce cas, les résultats obtenus confirment la tendance théorique que nous avons soulignée.

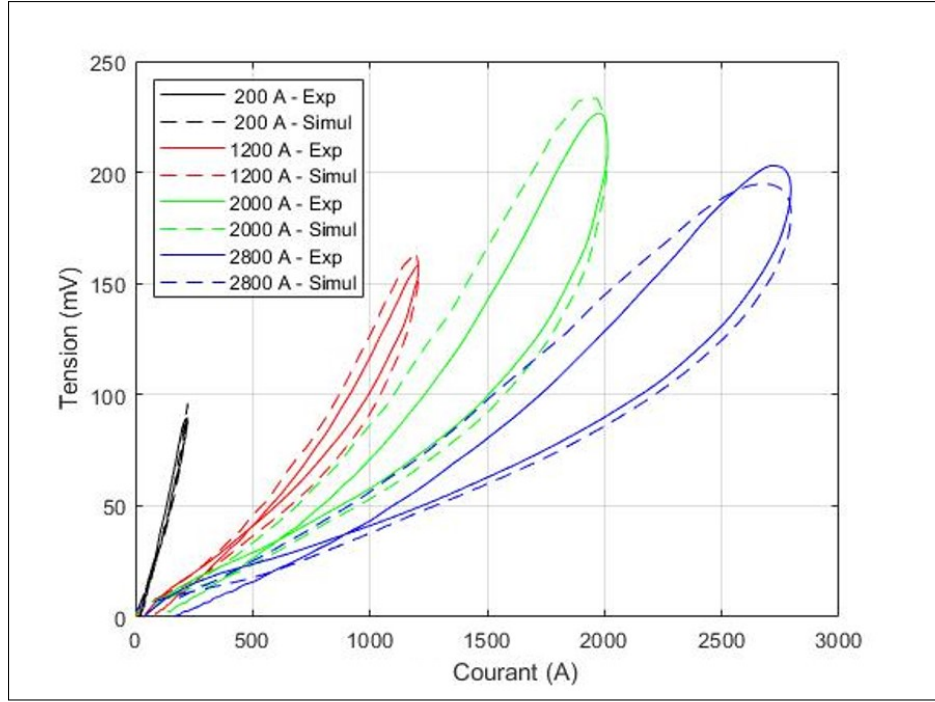


FIGURE 4.10 – Caractéristiques UI mesurées et calculées pour des intensités crêtes I_0 croissantes.

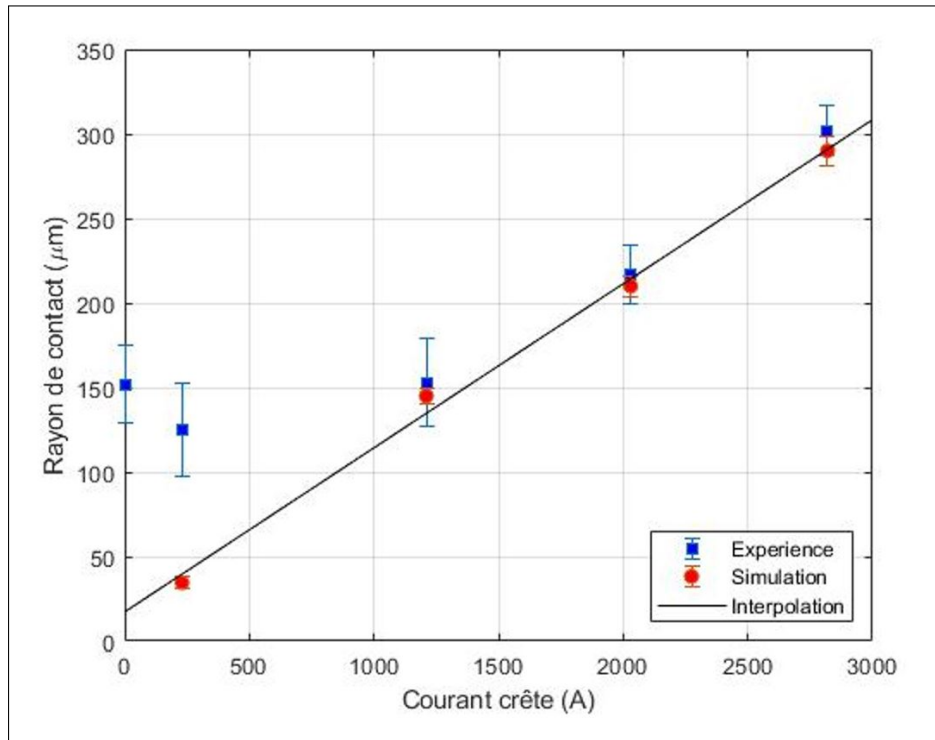


FIGURE 4.11 – Rayons de contact moyens mesurés déduits de la Figure 4.7, et rayons de contact déduits de la simulation.

À partir de la température de contact calculée à l'aide du modèle multiphysique, nous avons utilisé la formule de Kohlrausch (2.4) pour calculer la tension de contact. Cette tension de contact est comparée, sur la Figure 4.12, à la tension de contact mesurée et à la tension de contact déduite de la simulation.

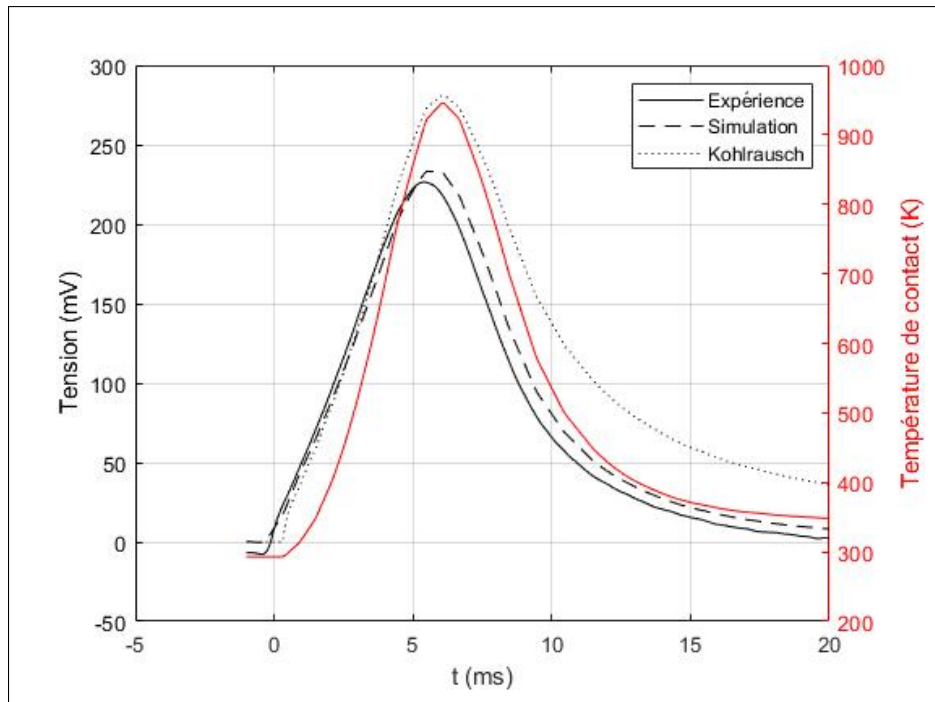


FIGURE 4.12 – Évolutions temporelles de la tension de contact mesurée, calculée par simulation numérique, et déduite de la formule de Kohlrausch à partir de la température de contact calculée.

Sur cette figure, nous constatons un très bon accord entre ces trois résultats pour la phase ascendante de l'onde de courant. Cela confirme la validité de la formule de Kohlrausch dans cette phase de la décharge de courant.

Ce résultat est particulièrement intéressant, puisqu'à partir de la tension de contact mesurée, nous pouvons déduire la température maximale de contact qui est quasiment impossible à mesurer pendant l'essai. En prenant la tension de contact maximale mesurée et en appliquant la formule de Kohlrausch, nous obtenons les températures (carrés bleus) de la Figure 4.13.

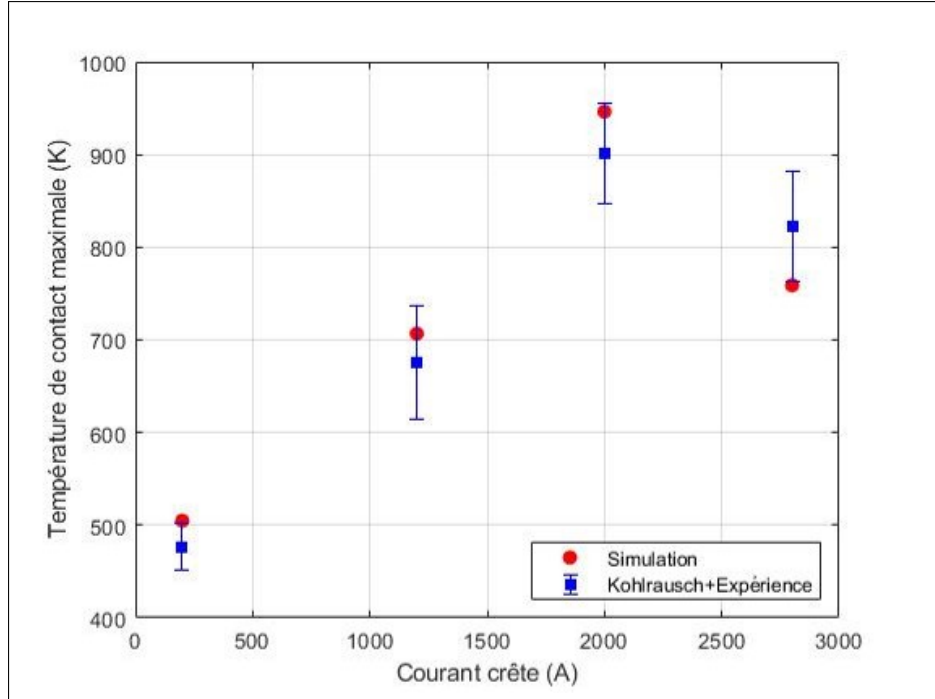


FIGURE 4.13 – Températures maximales du contact obtenues par la simulation numérique, et températures calculées via la formule de Kohlrausch à partir du maximum de tension de contact mesuré, pour différentes intensités crêtes I_0 .

Nous vérifions sur la Figure 4.13 que les températures maximales de contact déduites des deux approches sont en bon accord. Nous pourrions ainsi appliquer la méthode basée sur la mesure de tension de contact et la formule de Kohlrausch pour déduire la température maximale du contact avec une assez bonne précision. Nous rappelons que la connaissance de cette température est primordiale puisqu'elle conditionne la fusion ou pas du contact et donc son collage éventuel.

Enfin, il peut aussi être intéressant de déduire le rayon de la surface de contact à partir uniquement des mesures électriques et s'affranchir ainsi de la méthode optique. Pour cela, nous pouvons utiliser la formule de Holm (1.10) vue au chapitre 1. Le rayon de la surface de contact est déduit de la résistivité du matériau de contact et de la résistance de contact. Dans un premier temps, on détermine la température maximale de contact avec la formule de Kohlrausch et la mesure de la tension maximale de contact comme présenté ci-dessus. De cette température, à l'aide des tables de résistivité du matériau en fonction de la température, on en déduit la résistivité du matériau à la température maximale. Par ailleurs, la résistance de contact est déduite de la tension de contact maximale et du courant maximal mesurés. Nous en déduisons un rayon de surface de contact, dont les valeurs sont ajoutées sur la Figure 4.14.

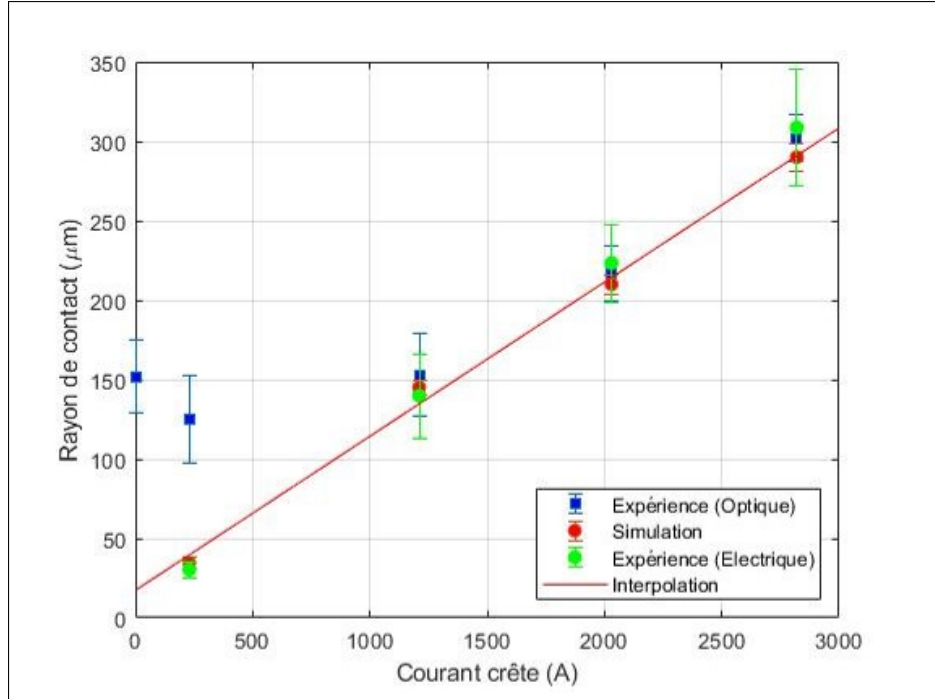


FIGURE 4.14 – Rayons de contact moyens mesurés optiquement et déduits de la Figure 4.7 (en bleu), rayons déduits de la simulation (en rouge) et rayons déduits des mesures électriques et des formules de Holm et de Kohlrausch (en vert).

Nous vérifions sur la Figure 4.14 que les rayons de surface de contact déterminés avec cette méthode sont en bon accord avec les rayons obtenus par la simulation ou l'expérience, excepté pour les faibles intensités dans ce dernier cas.

En outre, la cohérence entre les résultats de simulation (en rouge) et les résultats obtenus en utilisant les formules de Holm et de Kohlrausch (en vert) confirme le fait que nous pouvons regrouper les surfaces de contact en une surface unique, comme nous en avons fait l'hypothèse lors du chapitre 1.

Résumons à présent les apports de la simulation multiphysique. Elle nous a permis :

- De vérifier la validité de la formule de Kohlrausch dans la première partie de la décharge de courant ;
- De définir deux procédures de détermination du rayon de contact, ainsi que la température maximale atteinte par le contact, uniquement grâce aux mesures électriques et aux formules de Kohlrausch et de Holm.

4.2 Échauffement dans un contact statique avec évolution de la surface de contact

Nous avons étudié dans la première partie de ce chapitre les échauffements dans un contact statique dont la surface est constante, avec comme résultat des caractéristiques UI en forme de comportement 2. Nous allons maintenant nous intéresser à ce qu'il

se passe lors de la première décharge, lorsque les électrodes ont uniquement été mises en contact mécaniquement. Comme nous l'avons évoqué, la surface de contact évolue pendant cet essai, rendant la compréhension du phénomène plus complexe car il faut maintenant prendre en compte le couplage mécanique en plus des couplages électrocinétique et thermique.

Après avoir détaillé l'approche de cette étude d'un point de vue outils d'analyse, nous comparerons d'abord un exemple de résultat typique avec les informations trouvées dans la littérature, puis nous verrons quelles sont l'influence de l'intensité crête I_0 de la décharge de courant et l'influence de la force de contact statique F_c réglée avant l'essai.

4.2.1 Approche pour cette étude

Pour cette étude, nous utilisons plusieurs moyens d'investigation qui sont corrélés les uns aux autres et sont détaillés dans la suite de cette section :

- Les mesures électriques pour tracer les caractéristiques UI des contacts pendant l'essai ;
- Les observations microscopiques pour mesurer la surface de contact où est passé le courant et analyser plus finement la morphologie et la composition surfacique ;
- Et la simulation pour compléter et apporter des éléments supplémentaires dans l'interprétation des mesures expérimentales.

Mesures électriques

Les mesures électriques réalisées sur le gabarit « contact électrique statique » sont détaillées dans le chapitre 3. La mesure de tension s'effectue sur des parties non traversées par le courant, comme cela est illustré dans la Figure 3.3. Nous mesurons le courant avec la sonde Rogowski et la tension de contact avec la sonde passive de la marque Picoscope.

Observations microscopiques

Pour cette étude du comportement du contact pendant la première décharge, avec évolution de la surface de contact, nous avons en réalité observé les surfaces de contact non pas à la fin de cette première décharge, mais à la fin de la deuxième décharge d'intensité égale. Ce choix est justifié car nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que la taille de la surface de contact n'était pas impactée par une deuxième décharge à la même intensité.

La mesure optique pour déterminer le rayon de contact présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, avec un contraste lumineux qui reflète les différences de profondeur des surfaces de contact. Néanmoins cette mesure optique est en fait une mesure de la surface de contact apparente, qui peut être surestimée par rapport à la surface de contact réelle comme nous l'avons vu précédemment dans ce chapitre.

Simulation numérique

Pour compléter les mesures expérimentales et mettre en évidence les phénomènes physiques mis en jeu lors de nos expériences, nous avons utilisé un modèle simplifié, basé sur une analogie thermique-électrique, et résolu sous Matlab®. C'est un modèle approché qui a pour avantage de prendre en compte l'évolution de la surface de contact. Nous l'avons appliqué pour simuler l'échauffement du contact pendant la première décharge de courant.

4.2.2 Comparaison avec la littérature

Avant d'étudier plus précisément l'influence des paramètres expérimentaux I_0 et F_c sur l'échauffement du contact électrique lors de la première décharge de courant, nous allons vérifier si, pour une intensité crête I_0 et une force de contact statique F_c données, nous retrouvons bien les formes d'ondes décrites dans la littérature.

La Figure 4.15 présente le cycle UI typique obtenu pour une onde de courant d'intensité crête $I_0=2000$ A et une force de contact statique $F_c=6$ N qui est caractéristique des disjoncteurs modulaires.

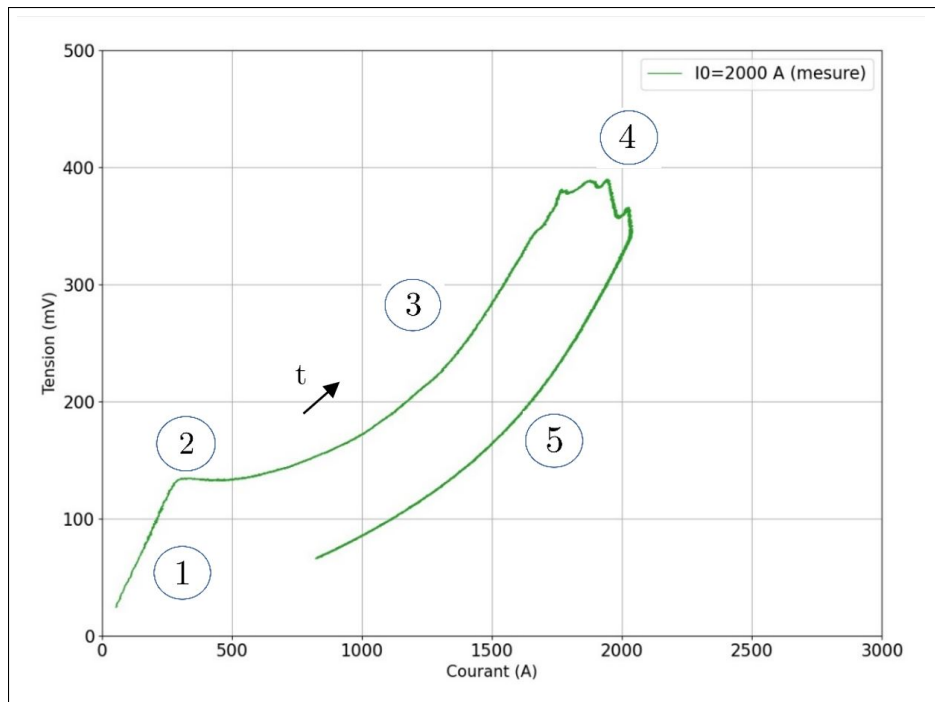


FIGURE 4.15 – Caractéristique UI typique obtenue pour un courant d'intensité crête $I_0=2000$ A et une force de contact statique $F_c=6$ N.

Sur cet exemple de résultat expérimental, nous retrouvons bien la forme et les différentes zones théoriques du cycle UI en comportement 1 décrites dans le chapitre 2 à la Figure 2.6 :

1. Le début de la caractéristique UI est une droite : la pente de la courbe, donc la résistance de contact reste constante.

2. Il y a une cassure dans la pente de la courbe UI , qui correspond probablement au ramollissement du matériau de contact le plus mou. Dans notre cas l' Ag .
3. La courbe suit une deuxième pente, la résistance de contact continue à augmenter avec une tension, donc une température du contact selon Kohlrausch qui augmente.
4. La courbe décrit un plateau avec de légères oscillations : c'est le plateau de fusion à une tension d'environ 370 mV.
5. La tension de contact diminue avec la phase de descente de l'onde de courant. Le contact se refroidit et se solidifie.

De plus, la tension de fusion de cet exemple est de l'ordre de 370 mV. Pour rappel, les électrodes testées sont constituées d' AgC d'un côté contre du cuivre revêtu de 5 μm d' Ag de l'autre côté. Cette valeur de 370 mV rejoint bien les valeurs expérimentales de tension de fusion présentées par Féchant à la Figure 2.7 : $U_{fusion}(Ag)=370$ mV pour un contact Ag vs Ag et $U_{fusion}(AgC)=380$ mV pour un contact AgC vs AgC .

L'ensemble de nos résultats expérimentaux sur ce type d'essais sont joints en Annexe C, et seront présentés en détail plus tard dans le chapitre.

4.2.3 Simulation de l'essai statique en comportement 1

Le modèle simplifié décrit dans cette partie est simulé grâce à un programme écrit en langage Matlab®. Il a d'abord été développé en interne avant cette thèse pour simuler les échauffements dans les armoires électriques. Pour ce travail de thèse, je l'ai ensuite repris et adapté pour l'étude de l'échauffement du contact électrique.

Ce modèle est capable de simuler l'échauffement du contact électrique jusqu'à la température de fusion. Sa principale force est d'associer un couplage thermoélectrique et un couplage mécanique. Le couplage thermoélectrique, basé sur le modèle ellipsoïdal de Holm, permet de calculer la répartition des lignes de courant et des lignes de flux thermique en fonction du temps. Le couplage mécanique prend en compte la modification des caractéristiques matériaux en fonction de leur température. Il permet ainsi de déterminer l'évolution temporelle du rayon de la surface de contact, ce qui est essentiel pour la simulation d'un essai en comportement 1 au vu de l'évolution importante de cette surface.

Hypothèses du modèle

Définition de la géométrie, des matériaux et des conditions aux limites

Géométrie du modèle

Pour ce modèle, nous utilisons une géométrie simplifiée telle qu'illustrée sur la Figure 4.16. Les dimensions de cette géométrie sont proches de celles des électrodes du disjoncteur modulaire et seront détaillées dans la suite de cette partie. Cette géométrie est axisymétrique, avec un CM qui est représenté par une électrode en cuivre ayant un angle de courbure de 106° comme dans la réalité. Le revêtement de $5\text{ }\mu\text{m}$ d'Ag est ici négligé dans un souci de simplification du modèle. En face, le CF est assimilé à une électrode en argent pur. Nous choisissons ici de négliger l'impact du faible pourcentage de graphite contenu dans l'AgC de l'électrode réelle. En effet pour ce modèle par analogie, nous devons connaître les caractéristiques des matériaux utilisés en fonction de leur température. La spécificité de l'AgC utilisé (processus de fabrication, pourcentage, orientation et taille des fibres de graphite) ne permet pas de les connaître.

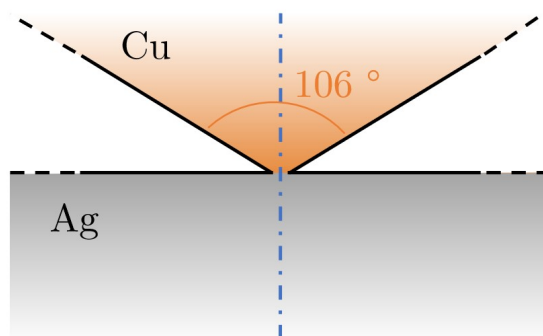


FIGURE 4.16 – Géométrie simplifiée du contact utilisée pour le modèle par analogie.

Propriétés des matériaux choisis

Afin de calculer l'échauffement du contact électrique, nous avons besoin de connaître les caractéristiques en fonction de la température pour les deux matériaux modélisés. Les résistivités électriques, les capacités thermiques massiques et les conductivités thermiques utilisées pour l'argent et le cuivre sont présentées dans l'Annexe B et sont extraites des références [12][64][65][66]. Une interpolation cubique sera effectuée pour obtenir les valeurs des caractéristiques pour chaque température calculée à la fin du pas précédent.

Nous avons également vérifié si les valeurs des résistivités ρ et des conductivités λ entrées pour le cuivre et l'argent satisfaisaient la loi de Wiedman-Franz définie au chapitre 1 par la relation (2.3). Pour une gamme de températures allant de la température ambiante jusqu'à la température de fusion de chacun des matériaux, le couple $\rho\lambda$ correspond bien au produit LT avec une valeur moyenne $L = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2 \cdot \text{K}^{-2}$. L'erreur relative entre $\rho\lambda$ et LT est inférieure à 8 % sur l'ensemble de cette gamme de températures, les courbes correspondantes sont jointes en Annexe D. L'erreur relative correspondante à la tension de contact calculée par la formule de Kohlrausch est inférieure à 4 %.

Comme nous l'avons vu avec les résultats présentés à la Figure 4.5, la taille de la surface de contact où passe le courant augmente pendant la première décharge. Cette évolution est fonction de la température du contact et des caractéristiques mécaniques du matériau de contact et est décrite par la relation (1.4). Dans notre cas, les matériaux en contact sont différents l'un de l'autre. Pour calculer l'évolution de la surface de contact, il faut donc prendre en compte la dureté du matériau le plus mou, l'argent, car c'est lui qui va le plus s'écraser sur l'autre matériau, et donc définir la taille de la surface de contact. Les courbes d'évolution de la dureté en fonction de la température sont bien plus rares dans la littérature par rapport aux données sur les autres caractéristiques des matériaux précédemment décrites. En effet la mesure de la dureté est en générale réalisée via des essais Brinell ou Vickers où un pénétrateur de faible déformabilité est enfoncé dans la surface du matériau à tester pendant un temps donné. Cette méthode de mesure est facilement réalisable à température ambiante mais devient beaucoup plus délicate lorsqu'il faut mettre le matériau à tester à une température stable durant toute la durée de l'essai. Nous avons trouvé deux sources qui détaillent l'évolution de la dureté de l'Ag en fonction de la température à partir de la température ambiante jusqu'à la température de fusion. Comme illustré sur la Figure 4.17, la première [29] donne les courbes pour l'argent fin faiblement recuit (courbe a) et pour l'argent fin fortement recuit (courbe b). La deuxième référence [38] présente les données pour l'argent (courbe c), sans plus de précisions sur le matériau.

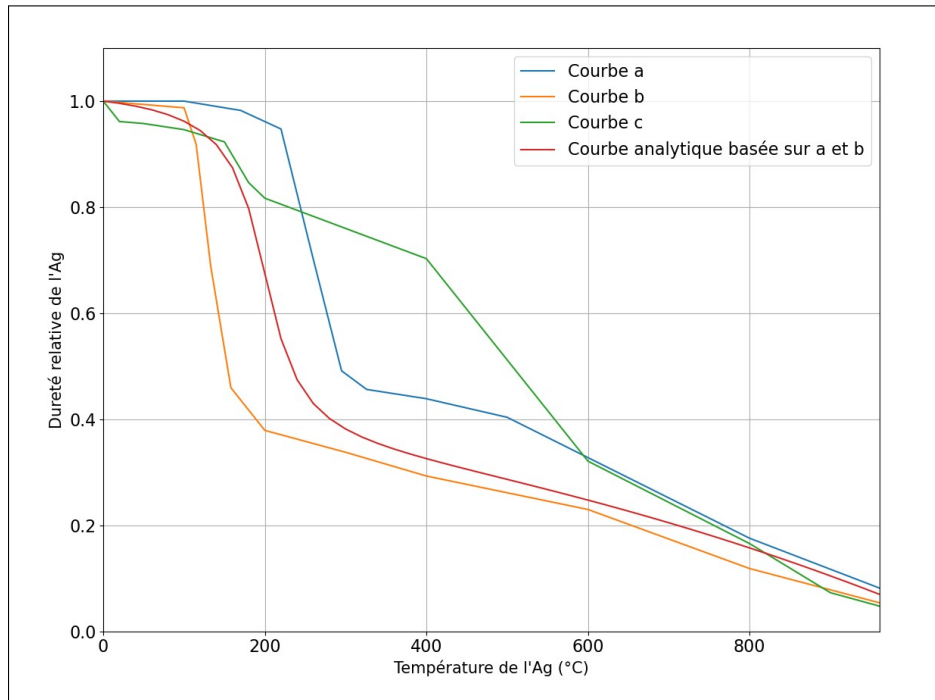


FIGURE 4.17 – Courbes de dureté relative de l'Ag selon différentes sources : courbe a pour l'Ag fin faiblement déformé et courbe b pour l'Ag fin fortement déformé selon [29] et courbe c pour l'Ag selon [38]. La dernière courbe en rouge représente l'expression analytique (4.1) inspirée de l'allure des courbes a et b et avec les coefficients : $b=0,7$, $k=0,03$, $T_R=200$ °C et $a=-3 \cdot 10^{-7}$.

Ces trois courbes se différencient surtout pour leur allure autour de la température de ramollissement du matériau. Les courbes a et b présentent une cassure nette avec une chute de dureté prononcée au moment du ramollissement, alors que la dureté de la

courbe c a plus tendance à diminuer régulièrement jusqu'à la fusion. Lors des premières simulations avec ce modèle, nous avons obtenu pour la courbe c des résultats assez éloignés des courbes expérimentales, où le palier de ramollissement n'était pas présent. Ce palier était au contraire présent en prenant les duretés relatives des courbes a et b puisqu'elles traduisent bien la chute de dureté, et donc l'élargissement de la surface de contact lors du ramollissement de l'Ag.

Après avoir sélectionné ces deux courbes a et b pour leur allure, nous avons testé une dernière courbe qui est basée sur l'expression analytique (4.1) permettant de reproduire l'allure des courbes a et b.

$$H_{relative} = \left(\frac{b}{\pi} [atan(-k(T - T_R)) - atan(k \cdot T_R)] + 1 \right) \cdot (a \cdot T^2) \quad (4.1)$$

Avec b le coefficient modifiant la hauteur de la chute de dureté à la température de ramollissement, k le coefficient pour rendre plus ou moins abrupte la cassure à la température de ramollissement, T_R la température de ramollissement en K et a le coefficient modifiant la pente de la partie linéaire après le ramollissement.

Nous avons ensuite choisi les bons coefficients pour que les courbes calculées correspondent au mieux à nos courbes expérimentales : $b=0,7$, $k=0,03$, $T_R=200$ °C et $a=-3 \cdot 10^{-7}$. Ces coefficients donnent une courbe qui est graphiquement une « moyenne » entre les courbes a et b.

Conditions aux limites

Dans ce modèle, seul le transfert thermique par conduction est pris en compte. Les phénomènes de convection et de rayonnement sont négligés. Les parois des électrodes sont considérées comme adiabatiques.

Description du modèle par analogie

Le modèle simplifié se base sur un modèle nodal dont les hypothèses sont décrites dans [67].

Découpage par blocs

La première étape de la modélisation est de définir le découpage de chaque électrode en blocs que nous appellerons cellules. Ces cellules doivent toutes présenter une unité suffisante, que ce soit géométriquement, physiquement et thermiquement. L'unité géométrique représente une forme découpée se ramenant à un volume simple, l'unité physique correspond à l'homogénéité du matériau et l'unité thermique traduit un mode de transfert de chaleur prépondérant unique avec une uniformité de la production de chaleur quand elle existe. Chaque cellule est donc supposée isotherme à une température T_n et ayant une capacité thermique C_{th} affectée au centre de la cellule qui est appelé « nœud ».

La difficulté du modèle nodal est d'arriver à définir le découpage en blocs qui satisfont la définition de cellule. Dans notre cas, nous nous servons du modèle ellipsoïdal de Holm évoqué au chapitre 1 et qui décrit le réseau d'isothermes et d'équipotentiels dans les électrodes de part et d'autre du contact électrique. Nous choisissons ainsi comme découpage des cellules dont les limites géométriques correspondent à des surfaces équipotentiels et isothermes définies par leur hauteur μ par rapport au contact. Pour les calculs présentés dans ce chapitre, il y a 25 cellules de hauteur identique pour chacune des deux électrodes. Elles sont réparties dans une zone allant du contact jusqu'à la surface équipotentielle et isotherme de hauteur $\mu=1,25$ mm. Nous avons choisi cette hauteur pour englober la zone de constriction des lignes de courant. La Figure 4.18 schématise la géométrie des six premières cellules choisies pour cette simulation sur la base du modèle ellipsoïdal de Holm.

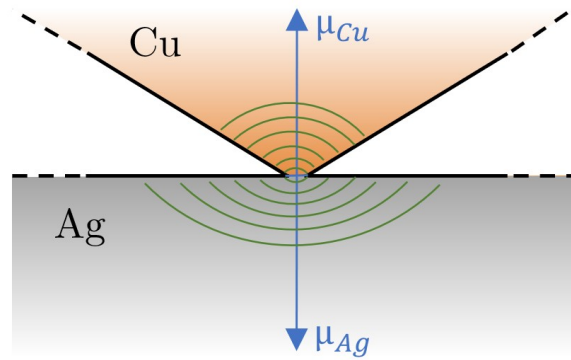
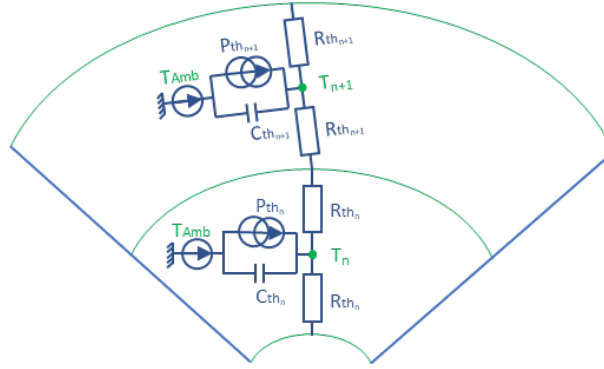


FIGURE 4.18 – Représentation schématisée des six premières cellules choisies pour le découpage nécessaire au calcul du modèle par analogie. Les cellules sont délimitées par les surfaces équipotentiels et isothermes selon le modèle de Holm. Leurs hauteurs sont identiques et égale à 1,25 mm divisé par le nombre de cellules dans chaque électrode, ici 25.

Transfert de chaleur et modèle électrique équivalent

Nous nous plaçons dans l'hypothèse d'un transfert de chaleur uniquement par conduction d'une cellule à l'autre dans les matériaux de contact. La contribution du transfert thermique par convection et par rayonnement est donc négligée, comme c'est le cas dans les hypothèses menant à la formule de Kohlrausch. Si nous considérons maintenant ce transfert thermique comme étant unidirectionnel, du contact électrique vers le reste des électrodes, et en utilisant l'analogie entre les grandeurs électriques et thermiques présentée dans [67], nous pouvons définir pour chaque cellule le schéma électrique équivalent qui est présenté à la Figure 4.19 pour les deux cellules successives n et $n + 1$.


 FIGURE 4.19 – Représentation de deux cellules n et $n + 1$ successives selon l'analogie thermoélectrique.

Pour chaque cellule de cette représentation, les résistances thermiques R_{th} , en série entre les deux cellules voisines, symbolisent la propriété de la cellule à résister au passage du flux de chaleur dans son matériau. Entre ces deux résistances, le nœud qui représente la température moyenne de la cellule est à la température T . Sur ce nœud arrivent en parallèle une source de courant P_{th} et une capacité thermique C_{th} qui influent directement sur la température T . La source de courant P_{th} représente le flux de chaleur produit par la cellule par effet Joule lors du passage du courant dans celle-ci. La capacité C_{th} correspond quant à elle à la capacité calorifique de la cellule, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut lui fournir pour que sa température augmente d'un degré. Elle est placée en parallèle de la source de chaleur P_{th} car la chaleur produite par P_{th} doit réchauffer suffisamment le matériau de la cellule via C_{th} pour que la température T puisse augmenter. De l'autre côté du couple P_{th} - C_{th} , une source de tension symbolise la température ambiante T_{amb} qui sert de température de référence à la cellule. En effet si aucun courant ne passe dans le contact, la température de la cellule sera celle de son milieu environnant.

Description du modèle par analogie

Avant de débiter le calcul des échauffements du contact statique, nous devons fixer les paramètres initiaux suivants :

- La durée totale simulée (10 ms) ainsi que le nombre de points de calcul (1000 points) ;
- La dureté du matériau le plus mou à température ambiante, pour pouvoir ensuite calculer à chaque pas de calcul la dureté du matériau en fonction de sa température grâce à la formule analytique de dureté relative (4.1) : $H=1000$ MPa ;
- La température ambiante qui sert également à initialiser la température de l'ensemble des cellules : $T_{amb}=20$ °C ;
- La force de contact statique F_c qui sera importante pour calculer le rayon de la surface de contact : $F_c=6$ N.

Résumé des étapes du script

Le script permettant le calcul des échauffements du contact fermé est constitué de deux parties : un entête et un programme principal.

Dans l'entête, nous devons choisir le fichier de données de courant mesurées expérimentalement lors d'un essai et qui seront utilisées par le programme pour le calcul des échauffements lors de cet essai. Nous fixons également dans l'entête l'ensemble des paramètres initiaux présentés dans le paragraphe précédent.

Le programme principal est plus conséquent et se décompose en plusieurs étapes :

- Création des fonctions pour le calcul des composantes thermiques des cellules (R_{th} , P_{th} et C_{th}) et pour le calcul de composantes géométriques utiles à la résolution des équations différentielles pour le calcul des échauffements (volume de chaque cellule, ...);
- À partir du schéma électrique de chaque cellule, écriture du système d'équations différentielles pour les 2x25 cellules que comporte notre géométrie simplifiée. Création de la fonction pour calculer à chaque pas le rayon de la surface de contact à partir de la formule $a(t) = \sqrt{\frac{F_c - F_{repulsion}(constriction)}{\pi \cdot H_{Ag}(T(t))}}$ en utilisant la formule (1.18) pour la force de répulsion, avec le rayon des amenées de courant $R=1$ mm et en prenant comme valeur de rayon de contact a la valeur calculée au pas précédent ;
- Création de la fonction pour le calcul de la température T_m à l'interface, à partir des températures et des résistances thermiques de la première cellule de cuivre et de la première cellule d'argent ;
- Résolution du système d'équations différentielles en utilisant la méthode d'intégration de Runge-Kutta d'ordre 4 ;
- Création des fichiers texte de résultats et affichage des courbes d'intérêt.

Pour le calcul du rayon de contact, nous introduisons dans le modèle une condition pour que ce rayon ne puisse pas décroître. Si le rayon de contact calculé pendant un pas est inférieur à celui du pas précédent, alors le modèle garde le rayon de contact du pas précédent. En effet lors de la phase de descente du courant, la diminution des pertes Joule fait baisser la température de contact calculée par le modèle. Selon l'équation (4.1), la dureté augmente donc à nouveau, ce qui aurait pour conséquence la diminution du rayon de contact. Or nous avons déjà vu qu'au cours de l'essai en comportement 1, le rayon de contact augmente durant la phase de montée de l'onde de courant mais reste ensuite constant lors de la phase de descente. Notre condition reflète bien ce phénomène.

Résultats

Grâce à ce modèle, nous pouvons calculer pour une intensité de courant mesurée expérimentalement : l'évolution du rayon de contact, de la tension de contact, de la température moyenne de chaque cellule et l'évolution de la température à l'interface. L'ensemble de ces informations va nous permettre d'expliquer au mieux la forme de la courbe expérimentale UI obtenue à la Figure 4.15.

Nous présentons ici les résultats obtenus pour les intensités crêtes $I_0=1200$ A et $I_0=2000$ A. Les caractéristiques UI calculées par le modèle par analogie sont présen-

tées à la Figure 4.20 et à la Figure 4.22, et les évolutions temporelles de la température et du rayon de contact calculées sont illustrées à la Figure 4.21 et à la Figure 4.23.

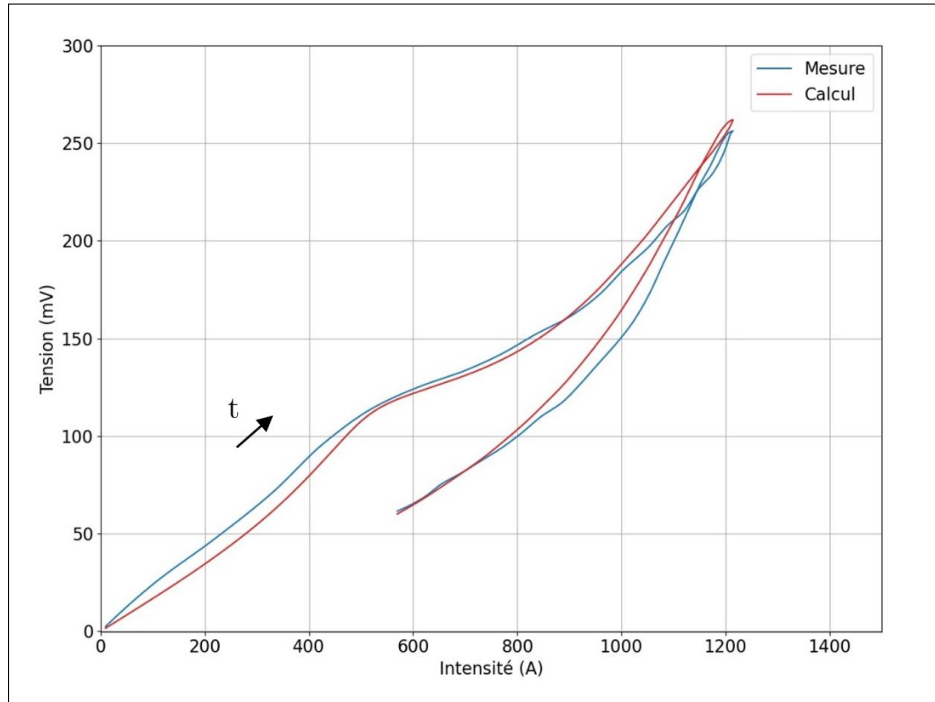


FIGURE 4.20 – Caractéristiques UI en comportement 1 expérimentale (en bleu) et calculée avec le modèle par analogie (en rouge) pour une onde de courant d'intensité crête $I_0=1200$ A et une force de contact statique $F_c=6$ N.

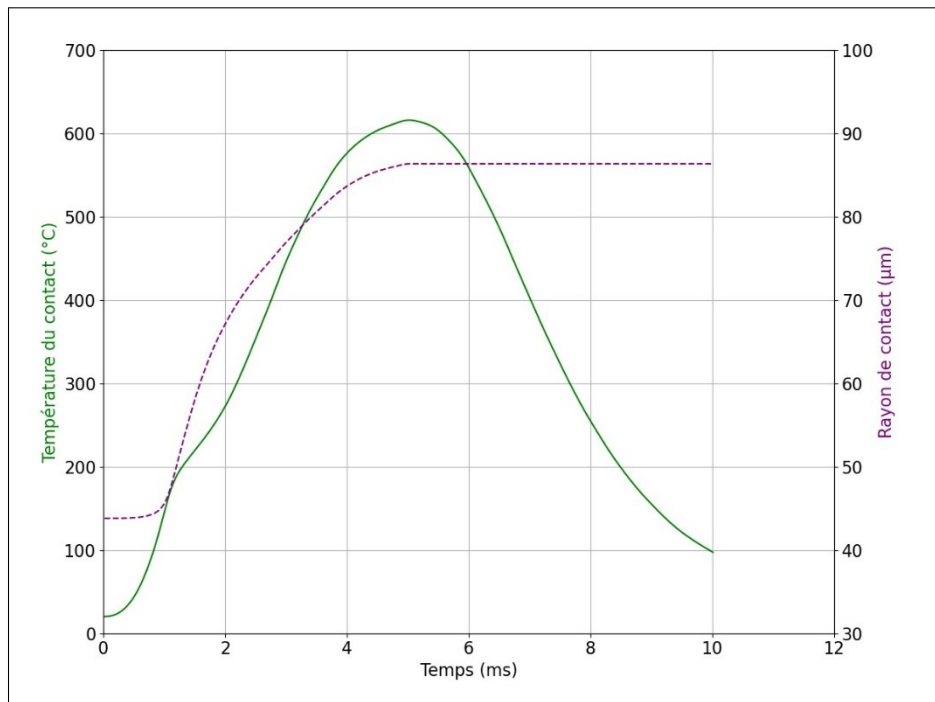


FIGURE 4.21 – Évolutions temporelles de la température et du rayon de contact pendant l'essai menant à la caractéristique UI calculée de la Figure 4.20.

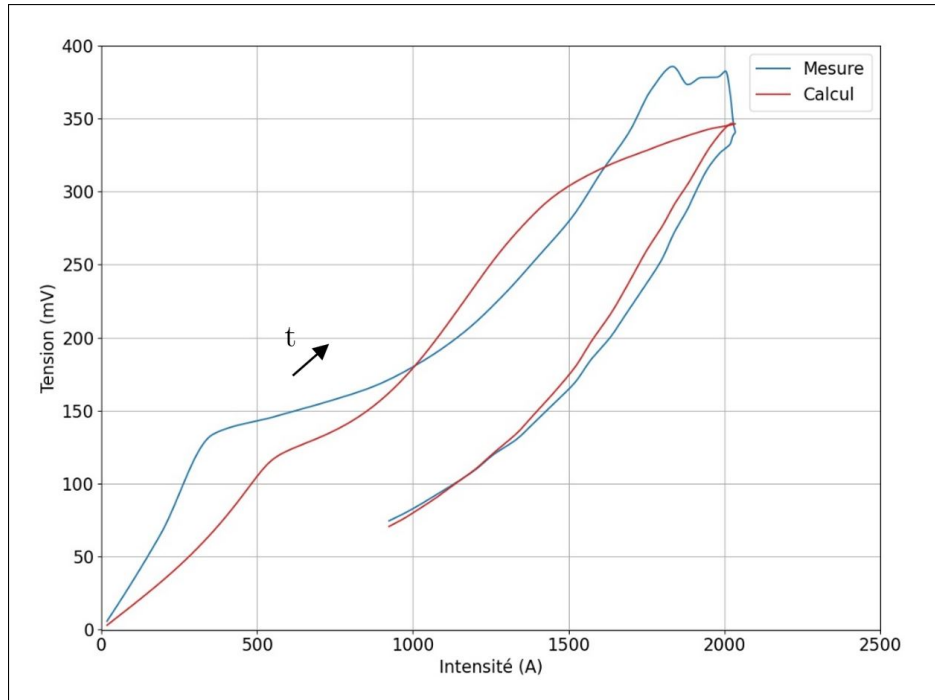


FIGURE 4.22 – Caractéristiques UI en comportement 1 expérimentale (en bleu) et calculée avec le modèle par analogie (en rouge) pour une onde de courant d'intensité crête $I_0=2000$ A et une force de contact statique $F_c=6$ N.

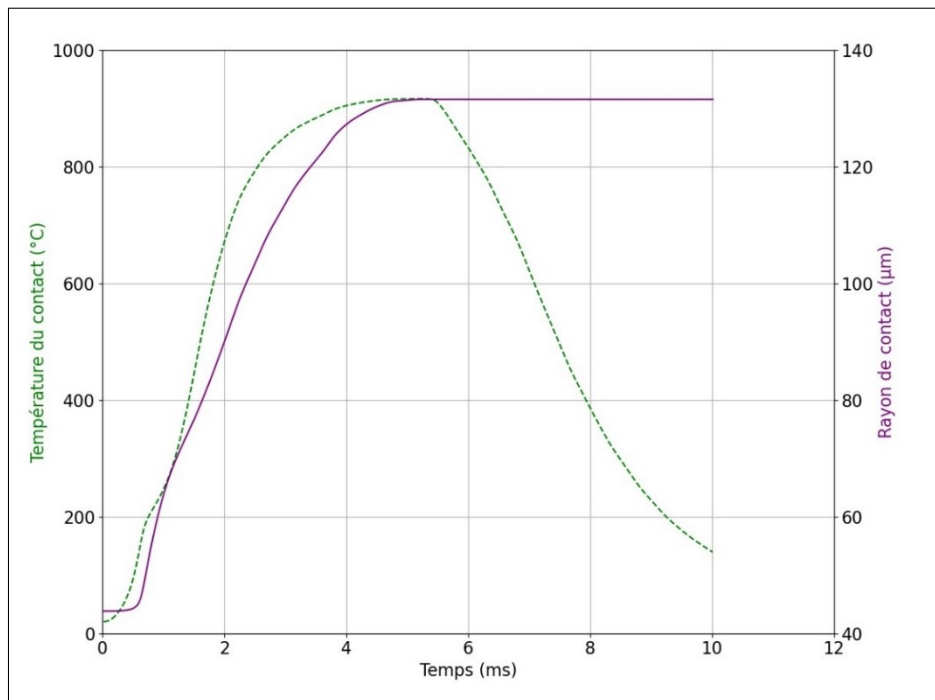


FIGURE 4.23 – Évolutions temporelles de la température et du rayon de contact pendant l'essai menant à la caractéristique UI calculée de la Figure 4.22.

Intéressons-nous tout d'abord aux résultats pour une intensité crête $I_0=1200$ A (Figure 4.20 et Figure 4.21). La courbe UI calculée avec le modèle par analogie coïncide bien avec la courbe expérimentale. De plus, nous pouvons voir que la cassure dans la pente des courbes UI vers $i=500$ A correspond à l'instant où le rayon de contact

commence à évoluer, vers $t=1$ ms, pour une température de contact d'environ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette température correspond à la température de ramollissement de l'Ag d'après Féchant [12]. Nous pouvons décrire cette cassure comme étant le palier de ramollissement du cycle UI . Pour suivre la forme de la suite de la courbe UI , la température et le rayon du contact continuent à augmenter jusqu'à l'intensité crête peu après $t=5$ ms, où le rayon de contact est maintenu constant étant donné la condition que nous lui avons imposée.

Rappelons ensuite que cette simulation est réalisée avec un modèle simplifié, à partir d'une géométrie de contact approchée. De plus et comme déjà évoqué, le modèle par analogie ne tient pas compte du changement de phase lors de l'entrée en fusion des matériaux, il n'est donc pas précis pour de forts courants, lorsque la fusion des matériaux est atteinte. La simulation pour une intensité crête de $I_0=2000$ A donne ainsi une courbe calculée plus éloignée de la courbe expérimentale. Cependant, nous pouvons également voir une cassure dans les pentes des courbes UI vers $i=350$ A pour la mesure et $i=550$ A pour le calcul. Pour la courbe calculée, cela correspond à l'instant où le rayon de contact commence à évoluer, vers $t=0.6$ ms. Nous retrouvons ainsi la température de contact d'environ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui comme pour l'intensité crête $I_0=1200$ A correspond à la température de ramollissement théorique de l'Ag.

Malgré son caractère simplifié, le modèle par analogie présenté dans cette partie nous a permis de compléter notre compréhension sur les phénomènes mis en jeu lors de l'échauffement du contact pendant la première décharge de courant. Les évolutions temporelles du rayon et de la température de contact sont en effet venues compléter la caractéristique UI en renforçant les interprétations faites pour le palier de ramollissement et la zone post-ramollissement.

Nous avons vu dans cette partie que les caractéristiques UI et les phénomènes physiques associés lors de nos essais sont conformes à ceux présentés dans la littérature. Nous allons maintenant étudier l'impact de deux paramètres expérimentaux sur l'échauffement du contact de coupure du disjoncteur pendant la première décharge de courant : la valeur de l'intensité crête I_0 de la décharge, et la force de contact statique F_c préréglée avant l'essai.

4.2.4 Influence de l'intensité crête I_0 sur l'échauffement

Dans cette partie, nous fixons la force de contact statique F_c à 6 N car c'est la force de contact typiquement présente dans les disjoncteurs. Pour étudier l'influence de l'intensité crête, nous testons des lots de cinq échantillons pour une intensité crête I_0 croissante : $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A, $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A. Nous analyserons d'abord les caractéristiques UI obtenues pour ces différentes intensités crêtes, puis nous étudierons l'évolution du rayon de contact et la modification de l'état de surface des électrodes pendant ces essais.

Caractéristiques UI

La Figure 4.24 représente les cycles UI mesurés typiques de chaque intensité crête lors de la première décharge de courant. Le graphique complet avec l'ensemble des échantillons est joint en Annexe C. Comme nous l'avons vu précédemment, le rayon de contact peut évoluer lors de cet essai en fonction de l'échauffement du contact. Nous observons donc des caractéristiques UI en comportement 1. De plus, le début de chacune des courbes UI n'est ici non plus pas représenté car le signal de tension est perturbé par des tensions induites.

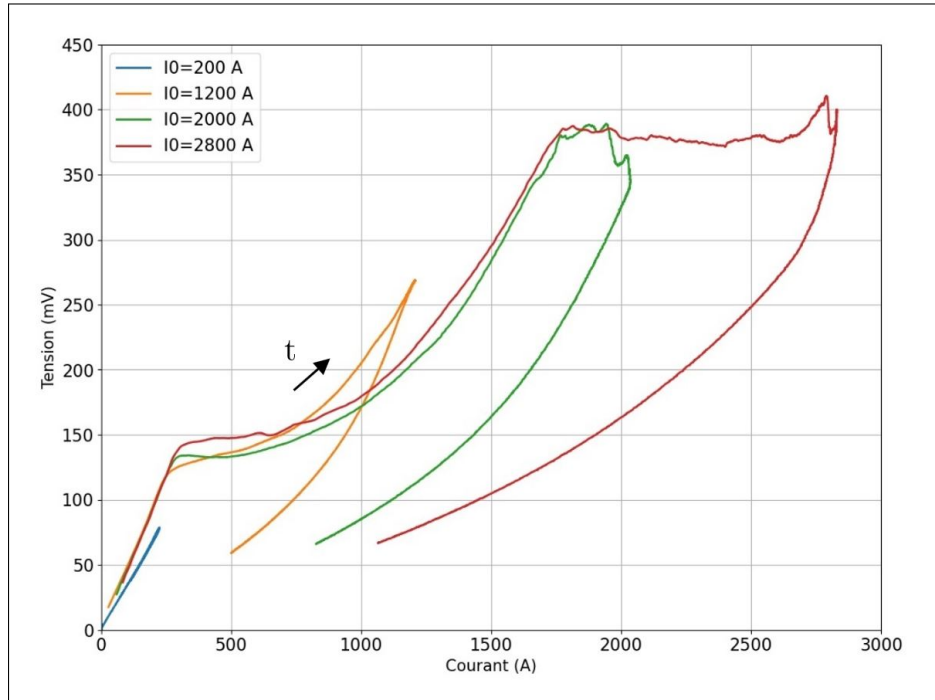


FIGURE 4.24 – Courbes UI typiques obtenues lors de la première décharge de courant pour des intensités crêtes I_0 croissantes. Dans un souci de clarté et pour chaque intensité crête I_0 testée, seule une courbe UI caractéristique est présentée ici. Le graphique complet comprenant toutes les courbes obtenues est présenté en Annexe C.

En fonction de l'intensité crête I_0 , nous observons sur la Figure 4.24 des caractéristiques UI qui suivent différentes zones théoriques extraites de la littérature et décrites à la Figure 2.6 :

- À $I_0 = 200$ A, la caractéristique UI est une droite, les échauffements sont faibles selon la formule de Kohlrausch. C'est la zone réversible. Sur ce graphique, la pente, donc la résistance à l'origine est plus faible pour $I_0 = 200$ A que pour les autres courbes. Cette particularité est due au choix de ne présenter que la caractéristique typique de chaque intensité crête. En Annexe C, nous pouvons voir que les pentes à l'origine des cycles UI sont dispersées, peu importe l'intensité crête I_0 ;
- Pour $I_0 = 1200$ A, la température de contact dépasse la température de ramollissement des matériaux en contact, d'où le passage de la caractéristique UI dans la zone post-ramollissement ;
- Les deux dernières intensités crêtes $I_0 = 2000$ A et $I_0 = 2800$ A mènent à la fusion des contacts avec un palier de fusion qui débute sur cette figure à un courant d'environ

1750 A pour une tension de fusion aux alentours des 380 mV.

Si nous nous intéressons au graphique de l'Annexe C comprenant les courbes UI de tous les échantillons, nous voyons que le début de la fusion est caractérisé par un courant limite compris typiquement entre 1700 A et 1900 A si nous excluons le cycle le plus à la marge ayant un courant limite à 1450 A. Nous verrons dans la section suivante si ce courant limite correspond au courant limite donné théoriquement au chapitre 2 pour l'Ag, pour différentes forces de contact statique F_c .

En ce qui concerne la tension de fusion de tous les plateaux pour $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A, nous pouvons observer une valeur moyenne différente en fonction de l'intensité crête I_0 . En effet la valeur moyenne est de 370 mV pour $I_0=2000$ A et de 390 mV pour $I_0=2800$ A. Si nous reprenons le principe de la relation de Kohlrausch, cette tension de fusion correspond à la température de fusion du matériau de contact. Or ici, nous avons un contact électrique constitué de plusieurs matériaux : le contact fixe en AgC et le contact mobile en Cu revêtu d'une couche de 5 μm d'Ag. D'après l'étude bibliographique faite au chapitre 2, la tension de fusion pour un contact Ag vs Ag est $U_{\text{fusion}}(\text{Ag})=370$ mV, celle pour un contact AgC vs AgC est $U_{\text{fusion}}(\text{AgC})=380$ mV et celle pour un contact Cu vs Cu est $U_{\text{fusion}}(\text{Cu})=420$ mV. À partir de ces valeurs de tension de fusion et pour interpréter nos résultats expérimentaux, nous pouvons faire l'hypothèse que la tension de fusion observée correspond à celle de l'alliage des matériaux en fusion. Il est à noter que du côté du CF, l'AgC est un matériau composite qui ne fond pas en tant que tel. C'est uniquement l'Ag qui va fondre vers 962 °C, les fibres de carbone ne fondent pas mais se subliment lorsque la température est bien plus élevée, vers 3650 °C.

Ici, en fonction de l'intensité crête I_0 , il y aurait donc dans le bain de fusion :

- Soit de l'Ag du CF allié à l'Ag du revêtement du CM ;
- Soit de l'Ag du CF allié à l'Ag du revêtement mais également au Cu du CM si la profondeur impactée thermiquement est plus importante.

Ainsi, pour $I_0=2000$ A, la tension de fusion mesurée à 370 mV en moyenne serait celle de l'alliage entre l'Ag provenant de l'AgC du CF et l'Ag du CM, ce qui correspond à la tension de fusion uni-matériau de l'Ag (370 mV). L'énergie thermique générée par les pertes Joule à $I_0=2800$ A étant plus importante, le bain fondu serait plus profond sur chacune des électrodes, ce qui impliquerait un alliage entre l'Ag du CF et l'Ag et le Cu du CM. La miscibilité du Cu dans l'Ag est faible, de l'ordre de 9 % maximum à température de 779 °C [68]. Mais cette proportion de Cu expliquerait l'augmentation de la tension de fusion mesurée dans nos essais à $I_0=2800$ A car la tension de fusion Cu vs Cu est de 420 mV.

Évolution du rayon de contact

Grâce à la simulation réalisée avec le logiciel COMSOL Multihysics[®], nous avons déterminé le rayon de contact réel a qui est constant tout au long de l'essai en comporte-

ment 2 (2ème décharge de courant). Ce rayon de contact est en réalité le même que celui à la fin de la première décharge de courant que nous étudions dans cette partie. En effet, il n'y a pas de séparation des électrodes de contact entre les deux décharges de courant.

Nous avons vu à la Figure 4.11 que le rayon de la surface de contact, plus exactement la surface à travers laquelle passe le courant électrique, est une fonction linéaire de l'intensité maximale de la décharge.

Modification des surfaces de contact

Pour estimer le résultat de la modification des surfaces de contact pendant la première décharge de courant, nous avons choisi d'observer les surfaces à la fin de la deuxième décharge. En effet comme nous l'avons déjà expliqué, ce protocole de mesure est réalisé en sachant que le rayon de contact ne varie pas pendant la deuxième décharge de courant.

Nous allons dans cette partie détailler dans un premier temps les observations réalisées au MEB pour des intensités crêtes croissantes. Puis nous analyserons les profils rugosimétriques des surfaces des contacts fixes que nous avons obtenus par microscopie optique. Pour chaque configuration de test, deux grossissements sont représentés dans les figures suivantes. Le premier est relativement faible (entre x100 et x150) et permet d'avoir une vision globale de la surface affectée par le passage du courant. Le deuxième est un zoom de l'encadré rouge de la première image, avec des grossissements de x500 à x1000 pour visualiser plus en détail comment les surfaces sont modifiées après les décharges de courant. Nous avons ainsi :

- Figure 4.25 le CF et Figure 4.26 le CM après deux décharges d'intensité $I_0=1200$ A ;
- Figure 4.27 le CF et Figure 4.28 le CM après deux décharges à $I_0=2000$ A ;
- Figure 4.29 le CF et Figure 4.30 le CM après deux décharges à $I_0=2800$ A.

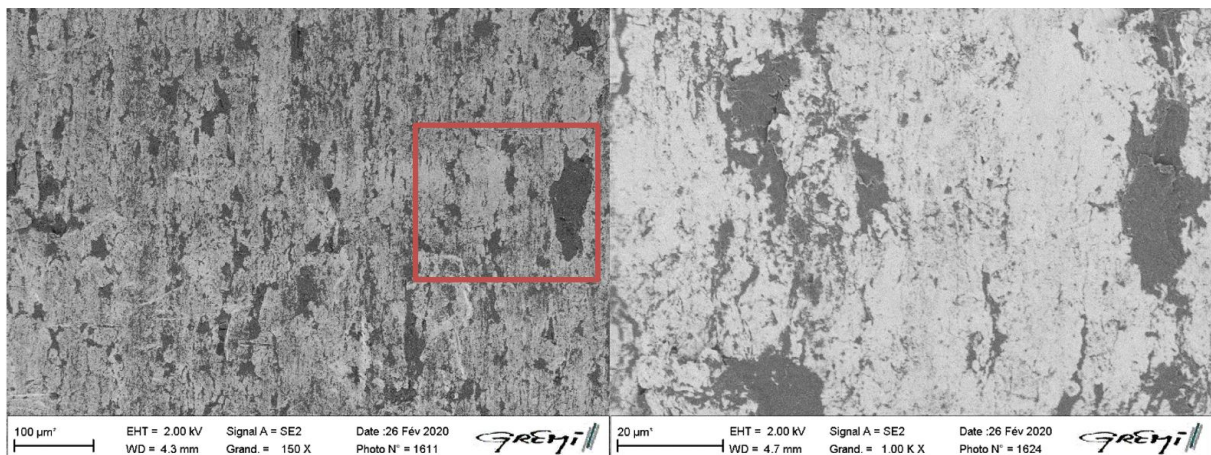


FIGURE 4.25 – Etat de surface d'un CF (AgC) après deux décharges d'intensité crête $I_0=1200$ A. Visualisation MEB à des grossissements x150 et x1000.

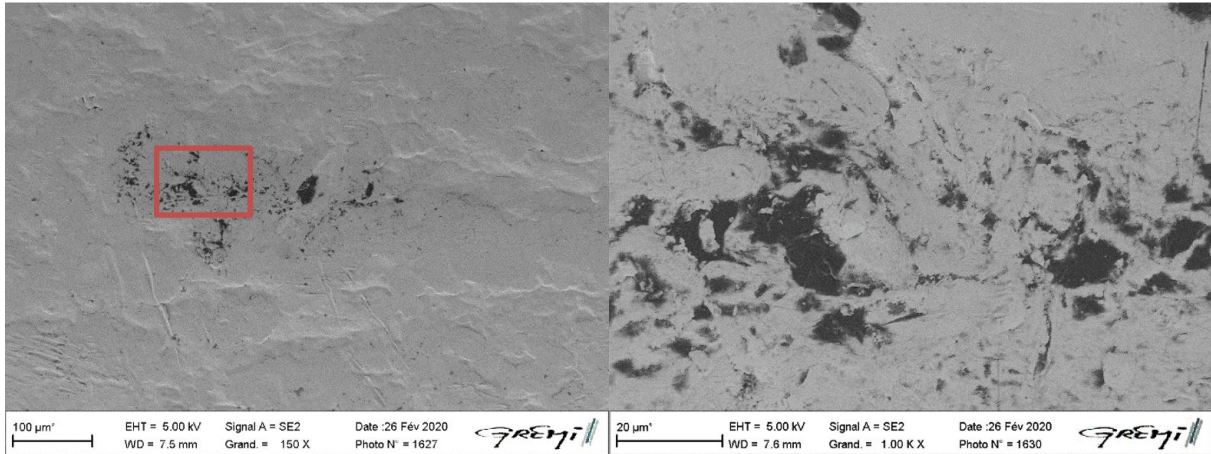


FIGURE 4.26 – Etat de surface d'un CM (Cu+Ag 5 µm) après deux décharges d'intensité crête $I_0=1200$ A. Visualisation MEB à des grossissements x150 et x1000.

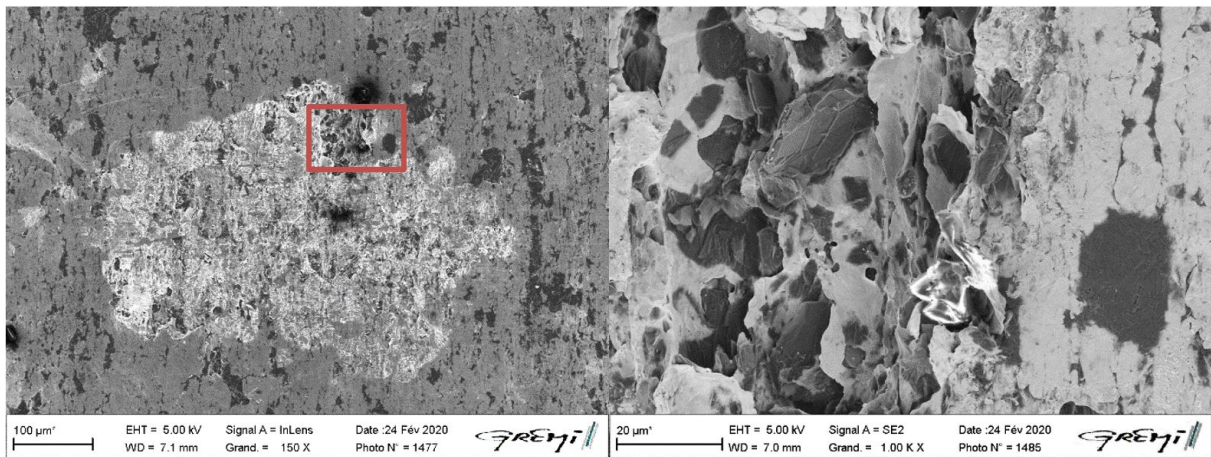


FIGURE 4.27 – Etat de surface d'un CF (AgC) après deux décharges d'intensité crête $I_0=2000$ A. Visualisation MEB à des grossissements x150 et x1000.

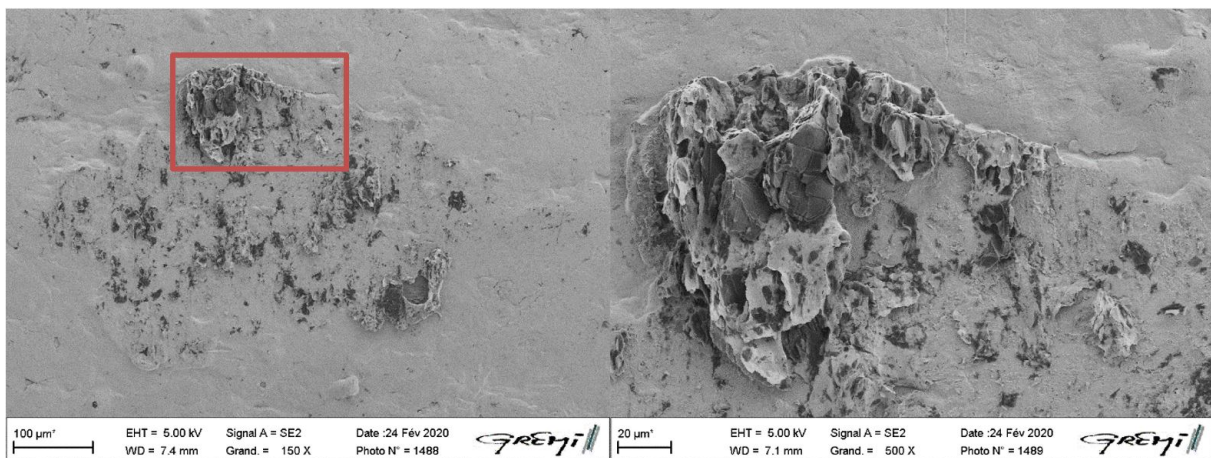


FIGURE 4.28 – Etat de surface d'un CM (Cu+Ag 5 µm) après deux décharges d'intensité crête $I_0=2000$ A. Visualisation MEB à des grossissements x150 et x500.

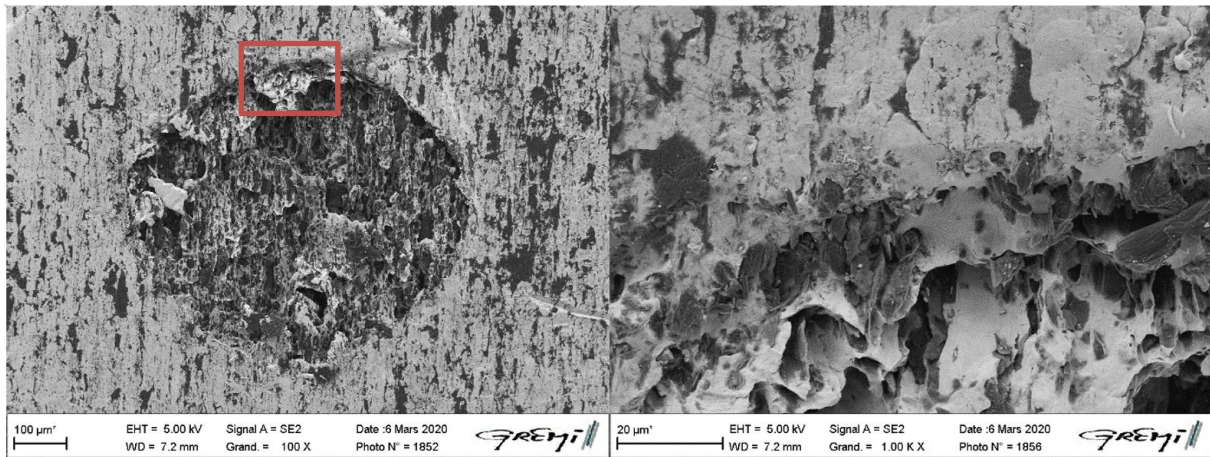


FIGURE 4.29 – Etat de surface d'un CF (AgC) après deux décharges d'intensité crête $I_0=2800$ A. Visualisation MEB à des grossissements x100 et x1000.

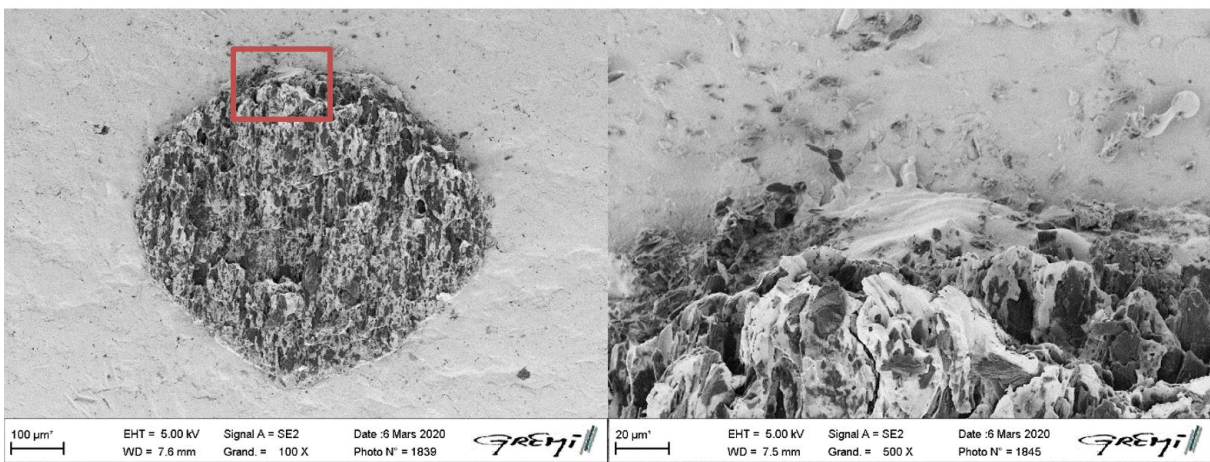


FIGURE 4.30 – Etat de surface d'un CM (Cu+Ag 5 µm) après deux décharges d'intensité crête $I_0=2800$ A. Visualisation MEB à des grossissements x100 et x500.

Les états de surface des échantillons avant essais sont visualisables sur la périphérie des micrographies faites à faible grossissement. Étant donné sa composition et sa méthode de fabrication par métallurgie des poudres puis extrusion, le CF en *AgC* présente une surface assez rugueuse, avec des stries de graphite nettement visibles. Le revêtement en *Ag* présent sur le CM est réalisé par dépôt électrolytique et paraît, quant à lui, plus lisse et régulier que la surface d'*AgC*.

Les surfaces de contact observées après les deux décharges à $I_0=200$ A ne sont pas représentées ici car elles sont sensiblement identiques à celles présentées dans la première ligne du Tableau 4.1 après la mise en contact des électrodes, sans passage de courant : la morphologie des surfaces est modifiée avec des zones de contact aplaties. Sur le CM, nous avons toutefois observé quelques légers dépôts de graphite provenant de la mise en contact avec le CF en *AgC*.

Pour $I_0=1200$ A, la surface de l'*AgC* du CF est de la même façon légèrement aplatie sur la Figure 4.25 et la géométrie des stries de graphite est modifiée. Sur le CM en face

(Figure 4.26), le revêtement en *Ag* apparaît lui aussi aplati à certains endroits du contact. De plus, le détecteur SE2 révèle à plus fort grandissement un apport de matière plus conséquent que pour $I_0=200$ A composée d'un élément clair et d'un élément plus sombre en forme de feuillets sur quelques petites zones de la surface de contact apparente. Il s'agit d'après l'analyse EDX réalisée de morceaux d'*AgC* qui ont été arrachés du CF lors de la séparation des contacts à la fin des essais. Même si ces zones sont très localisées au regard de la surface de contact totale visible sur ces micrographies, l'arrachage de l'*AgC* est une preuve qu'il y a eu des collages locaux par thermocompression pendant la première décharge de courant, avec un rayon de contact qui a augmenté.

Les surfaces observées après des décharges d'intensité $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A sont totalement différentes, ce qui coïncide avec leurs caractéristiques *UI* où le plateau de fusion a été atteint. Ici, nous pouvons nettement visualiser la modification de la structure de l'*AgC* du CF, avec des cratères correspondant aux morceaux d'*AgC* arrachés du CF. Ces cratères sont assez présents sur la Figure 4.27 pour $I_0=2000$ A, et sont visibles sur l'intégralité de la surface de passage du courant pour $I_0=2800$ A. Nous retrouvons sur le CM de la Figure 4.28 et de la Figure 4.30 ces morceaux d'*AgC* arrachés des CF. Nous avons également observé sur les bords des surfaces de contact de ces CM des projections de gouttelettes métalliques fondues puis solidifiées. De plus, l'analyse EDX de la coulée de matière sur le fort grandissement de la Figure 3.16 a montré qu'il s'agit d'un alliage de cuivre et d'argent. C'est une preuve supplémentaire de fusion pour l'essai à $I_0=2800$ A puisque ces deux matériaux n'étaient pas alliés avant la décharge de courant.

Intéressons-nous de nouveau à la tension de fusion moyenne plus élevée pour $I_0=2800$ A que pour $I_0=2000$ A évoquée plus haut. Nous avons fait l'hypothèse que la tension de contact plus élevée était due à la proportion de cuivre plus élevée dans le bain fondu, c'est-à-dire à une dégradation plus importante du revêtement d'argent sur le CM. Malheureusement sur nos observations de surface au MEB, nous ne pouvons pas voir sur le CM si le revêtement d'*Ag* est dégradé ou non là où la fusion a eu lieu. En effet dans ces zones de fusion, le refroidissement des matériaux entraîne la soudure des surfaces en contact, et après arrachage, nous ne voyons plus que des morceaux d'*AgC* qui recouvrent la surface du CM précédemment fondue.

L'analyse 3D des électrodes par le microscope optique numérique Keyence nous a permis d'obtenir les profils rugosimétriques des surfaces de contact. Comme nous l'avons expliqué au chapitre 3, l'importante courbure des CM dégrade la résolution en hauteur de leur profils rugosimétriques. Nous ne présenterons donc ici que les résultats obtenus pour les CF, avec un échantillon typique choisi pour chaque configuration de courant. Les figures suivantes (Figure 4.31, Figure 4.32, Figure 4.33 et Figure 4.34) représentent, pour les quatre intensités I_0 croissantes :

- L'image 2D brute ;

- L'image 2D en noir et blanc ;
- L'image 2D dont la couleur représente la hauteur du pixel le plus net ;
- Et l'image 2D des contours des zones situées dans la même plage de hauteur.

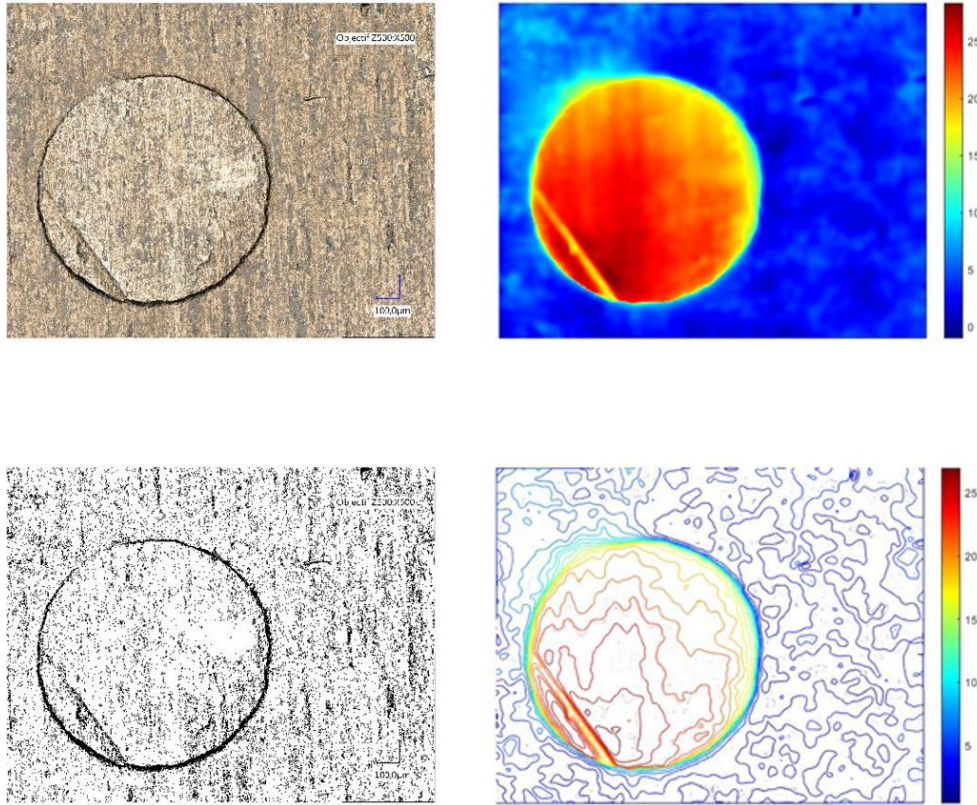


FIGURE 4.31 – Résultats de l'analyse de rugosimétrie du CF après deux décharges à $I_0=200$ A. La largeur des images est de 1,905 mm et leur hauteur de 1,496 mm. Pour les quatres figures présentant les résultats de l'analyse de rugosimétrie, l'unité de l'échelle de hauteur est le μm .

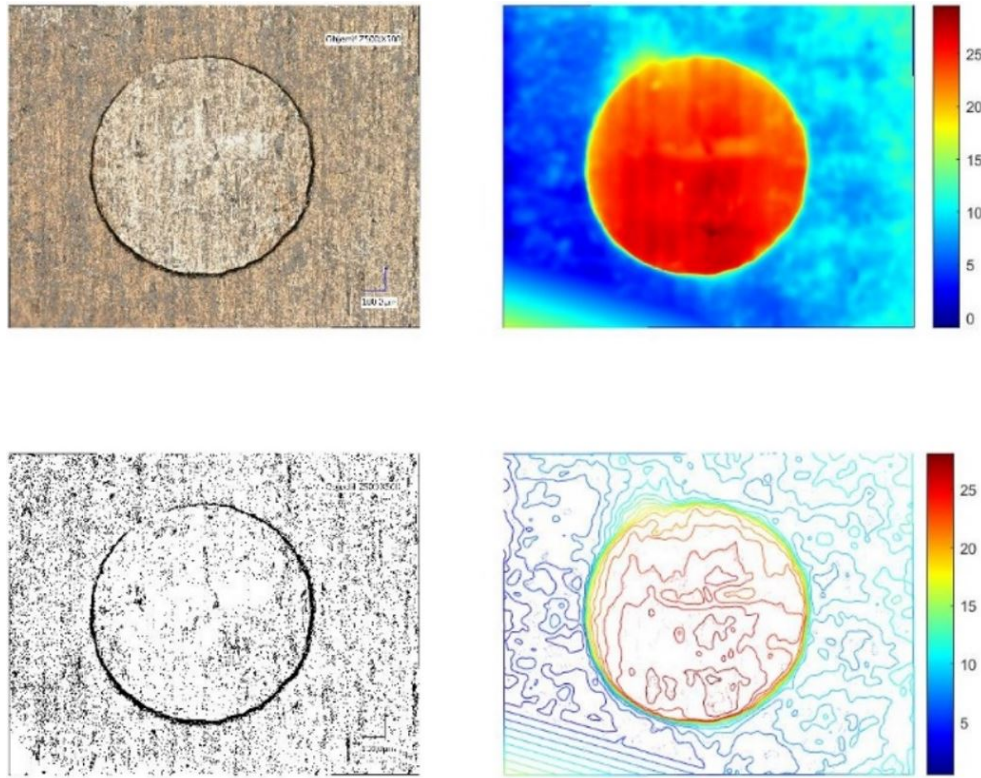


FIGURE 4.32 – Résultats de l'analyse de rugosimétrie du CF après deux décharges à $I_0=1200$ A. La largeur des images est de 1,905 mm et leur hauteur de 1,496 mm.

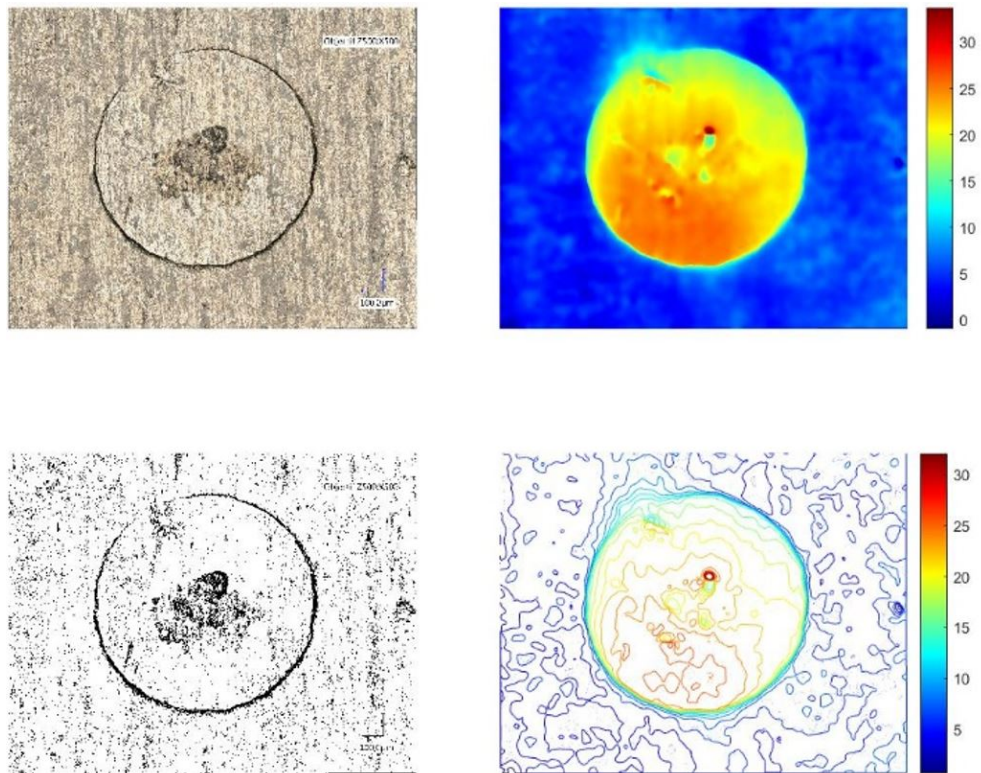


FIGURE 4.33 – Résultats de l'analyse de rugosimétrie du CF après deux décharges à $I_0=2000$ A. La largeur des images est de 1,905 mm et leur hauteur de 1,496 mm.

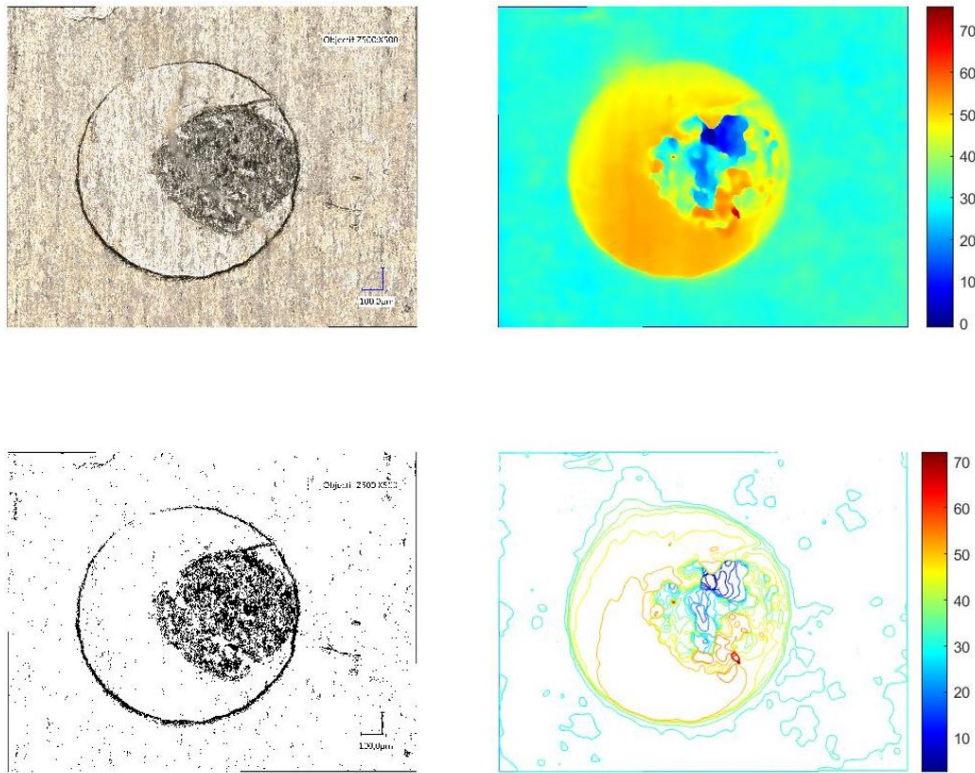


FIGURE 4.34 – Résultats de l’analyse de rugosimétrie du CF après deux décharges à $I_0=2800$ A. La largeur des images est de 1,905 mm et leur hauteur de 1,496 mm.

La Figure 4.31 confirme le faible impact du passage des deux décharges d’intensité crête $I_0=200$ A : la zone de contact des électrodes est légèrement visible sur les images en couleurs brutes et en noir et blanc, cependant elle ne l’est pas sur les deux images de droite. La surface du CF n’est donc pas significativement modifiée en profondeur. Après les deux décharges à $I_0=1200$ A, la zone de contact est également visible sur les images en couleurs brutes et en noir et blanc (Figure 4.32). Cette fois nous pouvons aussi la distinguer en couleur orangée sur les deux images de droite. Cela coïncide avec les collages locaux par thermocompression et les arrachages d’*AgC* éparses visualisés avec le MEB en début de partie. L’électrode de la Figure 4.33 qui a subi une fusion lors de la première décharge à $I_0=2000$ A présente une zone de contact sombre et beaucoup plus discernable sur les images en couleurs brutes et en noir et blanc. La différence de hauteur associée est également plus contrastée sur les deux images de droite par rapport à celles pour les deux intensités crête précédentes, avec jusqu’à 10 μm de profondeur d’*AgC* arrachée, ce qui correspond aux morceaux d’*AgC* arrachés lors de la séparation des électrodes à la fin des essais électriques. Enfin, la Figure 4.34 ne laisse pas de doute quant à l’ampleur de l’impact du passage du courant d’intensité crête $I_0=2800$ A. La fusion des matériaux lors de la première décharge suivi de l’arrachage de l’*AgC* lors de la séparation des électrodes laisse une zone de contact très foncée et nettement identifiable sur les images de gauche en couleurs brutes et en noir et blanc. Ici l’ensemble de la zone de contact est creusé sur les images de droite, avec une profondeur d’*AgC* arrachée plus profonde que pour $I_0=2000$ A et qui atteint 50 μm .

L'ensemble des résultats de ces analyses 3D concorde avec les observations réalisées au MEB. Pour les intensités $I_0=1200$ A, $I_0=2000$ A et $I_0=2800$ A, les états de surfaces sont de plus en plus endommagés avec l'augmentation de I_0 et la surface et la profondeur de matière *AgC* arrachée est également de plus en plus grande. Cette surface arrachée de l'*AgC* est une preuve de la fusion préalable des matériaux en contact à cet endroit. Cependant, les profondeurs des morceaux d'*AgC* arrachés ne peuvent pas être directement reliées à la profondeur du bain fondu, ni à une quelconque force de collage. Pour estimer la profondeur du bain de fusion, nous aurions par exemple pu réaliser des coupes métallographiques pour observer les différentes couches de matière résultant des essais électriques, mais cela n'a pas pu être réalisée à cause d'un accès limité dans le temps au laboratoire.

4.2.5 Influence de la force de contact statique F_c sur l'échauffement

Nous étudions dans cette partie l'influence de la force de contact statique F_c lors de la première décharge de courant après la mise en contact des électrodes. Cette force est préréglée avant l'essai via la contrainte d'un ressort présent sur le gabarit « contact électrique statique ». Dans le premier chapitre de ce manuscrit dédié au contact électrique, nous avons vu qu'une force de contact plus importante avait tendance à augmenter la surface de contact, et donc à diminuer la résistance de contact et les échauffements. Nous allons vérifier cette théorie en déterminant pour chaque force de contact le courant limite qui mène à la fusion des contacts, donc potentiellement à leur collage si la force de séparation des électrodes n'est pas suffisante.

Pour cette étude, nous choisissons trois valeurs de force de contact statique : la force actuellement présente dans les produits $F_c=6$ N, ainsi que sa moitié $F_c=3$ N et son double $F_c=12$ N. Pour chacune de ces valeurs de force, nous testons un lot de cinq échantillons aux courants d'intensité crête $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A et $I_0=2000$ A.

Caractéristiques UI et rayons de contact associés

Les trois graphiques suivants représentent les caractéristiques UI moyennes lors de la première décharge de courant, pour chaque force de contact statique F_c et pour une intensité crête $I_0=200$ A (Figure 4.35), $I_0=1200$ A (Figure 4.36) et $I_0=2000$ A (Figure 4.37). Les graphiques complets illustrant les caractéristiques de l'ensemble des échantillons testés sont joints en Annexe E.

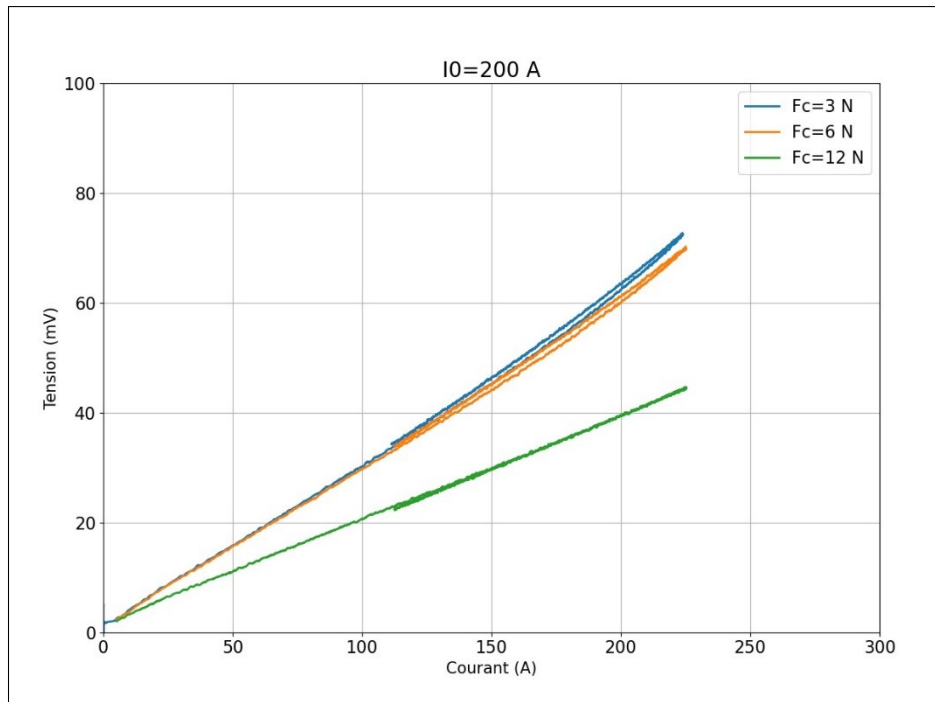


FIGURE 4.35 – Caractéristiques UI moyennes pour une force de contact F_c croissante et une intensité crête $I_0=200$ A.

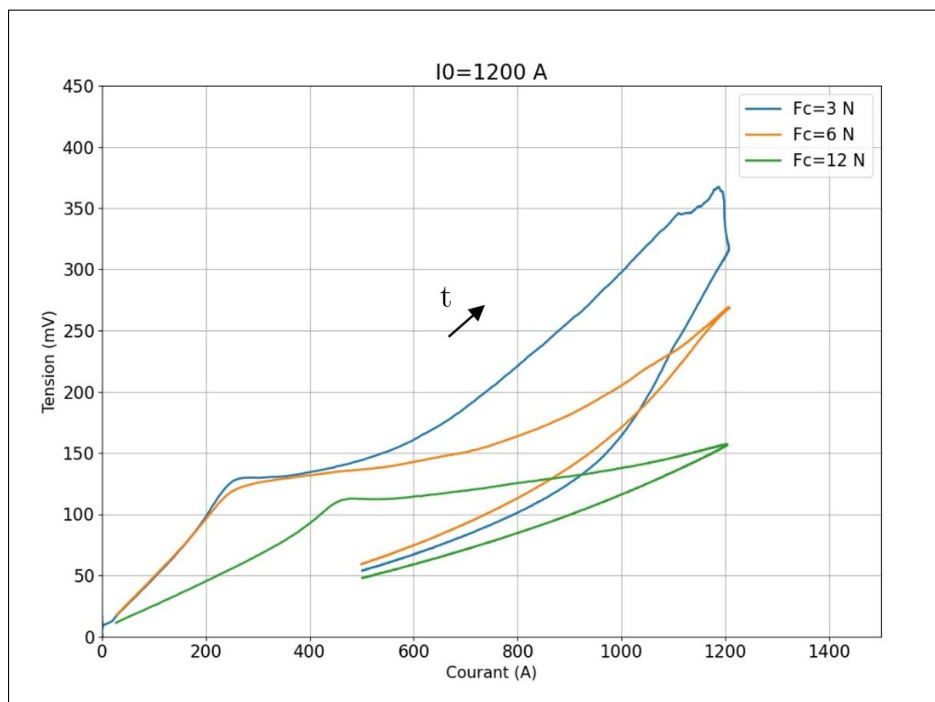


FIGURE 4.36 – Caractéristiques UI moyennes pour une force de contact F_c croissante et une intensité crête $I_0=1200$ A.

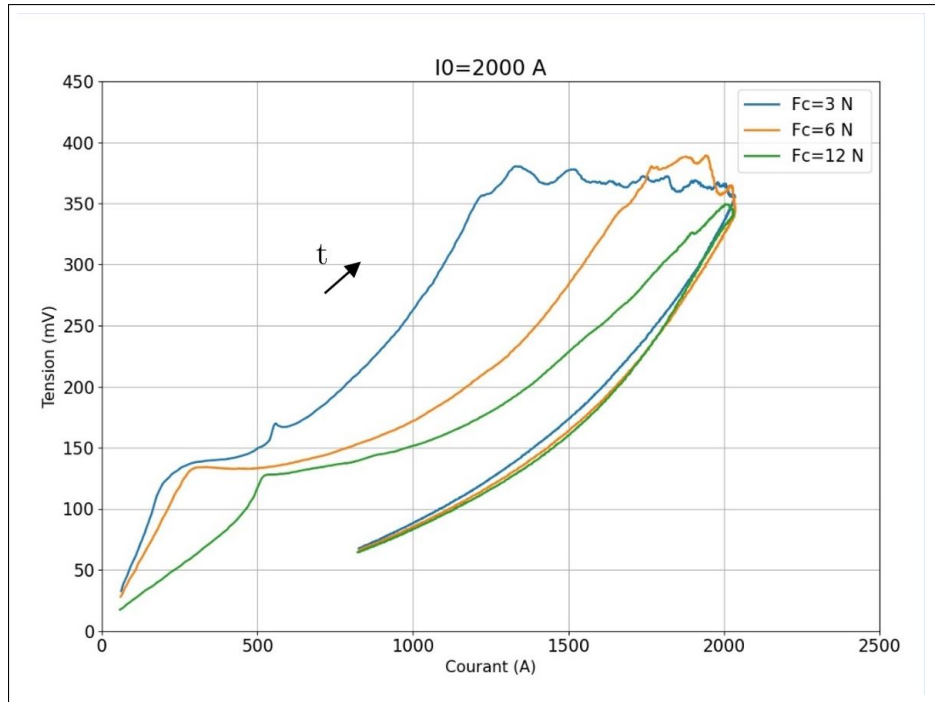


FIGURE 4.37 – Caractéristiques UI moyennes pour une force de contact F_c croissante et une intensité crête $I_0=2000$ A.

Avant de présenter les rayons de contact associés à ces caractéristiques UI et d'analyser l'ensemble, nous pouvons en s'appuyant sur l'Annexe E observer que pour toutes les intensités I_0 testées, les caractéristiques UI sont de plus en plus reproductibles au sein d'un même lot d'échantillons lorsque la force de contact F_c augmente. En effet une force de contact plus élevée a tendance à écraser plus fortement les aspérités présentes à la surface des électrodes (cf chapitre 1), ce qui lisse les légères différences de rugosité inter-échantillon qui peuvent exister et permet d'obtenir un contact électrique plus similaire d'un point de vue échauffements d'un échantillon à l'autre dans la même configuration.

Pour compléter les résultats électriques obtenus pendant la première décharge de courant, les précédents résultats de ce chapitre ont souligné l'importance de l'évolution de la surface de contact pendant l'essai comme une réponse des matériaux de contact aux échauffements qu'ils subissent. Sur le même modèle que celui de la Figure 4.14, le graphique de la Figure 4.38 synthétise les rayons de contact R_{equ} mesurés en moyenne pour chaque configuration pour les trois forces F_c testées et les intensités crête I_0 croissantes. Pour rappel, les rayons R_{equ} mesurés par microscopie optique sont visualisés à la fin de la deuxième décharge de courant, par souci de gain de temps et en ayant en tête le rayon de contact qui reste constant pendant la deuxième décharge pour l'essai en comportement 2. Nous pouvons les considérer comme étant égaux aux rayons de contact à la fin de la première décharge qui nous intéresse dans cette partie.

Il est également à noter que les pourcentages d'erreur relative pour la mesure du rayon

de contact par microscopie optique sont assez élevés pour $I_0=200$ A puis se réduisent pour $I_0=1200$ A et pour $I_0=2000$ A. La zone de contact est en effet plus contrastée, et donc plus discernable lorsque le contact a subi des collages locaux par thermocompression ($I_0=1200$ A) ou une fusion plus globale ($I_0=2000$ A).

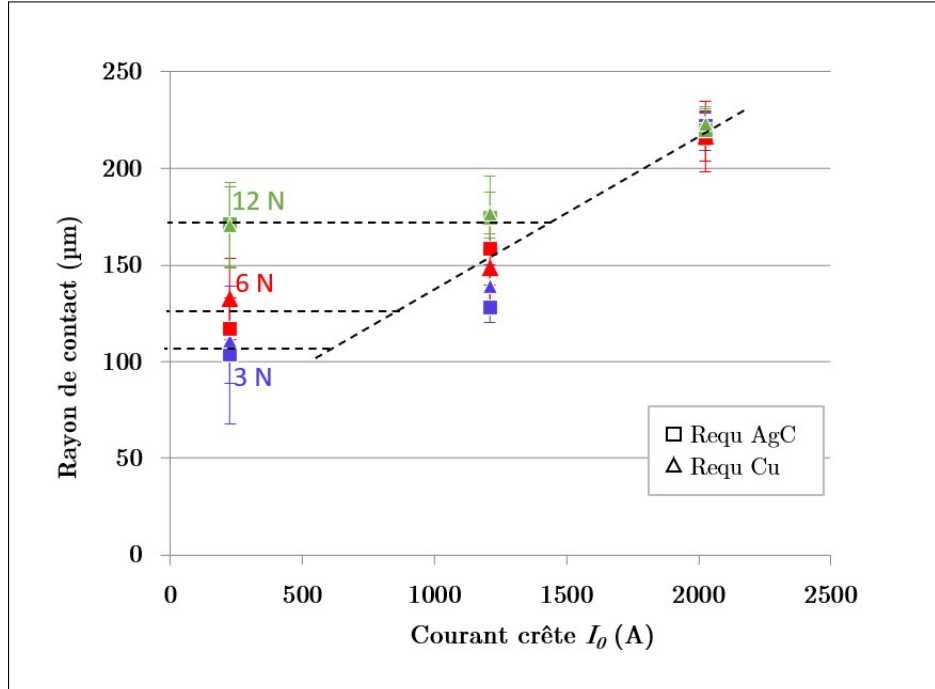


FIGURE 4.38 – Synthèse des rayons de contact R_{equ} mesurés moyens pour les trois forces F_c testées et en fonction de l'intensité crête I_0 de la décharge de courant. Les pourcentages d'erreur relative sont en moyenne de 18 %, 10 % et 5 % pour respectivement $I_0=200$ A, $I_0=1200$ A et $I_0=2000$ A.

Pour une onde de faible intensité crête $I_0=200$ A, le graphique de la Figure 4.35 présente des courbes UI qui restent dans la zone réversible, avec une pente constante. Plus la force de contact est grande, plus la pente de la droite est faible, ce qui traduit une résistance de contact moins élevée. Sur la Figure 4.38, les rayons de contact R_{equ} mesurés sont de plus en plus grands en fonction de l'augmentation de F_c , ce qui est en accord avec la formule (1.16). Cela coïncide également avec les résultats des cycles UI . Pour de faibles valeurs d'intensité de courant, plus la force F_c augmente, plus le rayon de contact associé augmente, et donc plus la résistance de contact à l'origine des cycles UI diminue. Les échauffements du contact électrique sont de ce fait réduits de manière globale sur tout le cycle. Pour de plus fortes intensités de courant, l'augmentation de la force de contact aura également pour conséquence de repousser le courant limite où la fusion du contact débute.

Si nous augmentons l'intensité crête à $I_0=1200$ A, tous les cycles UI de la Figure 4.36 atteignent la tension de ramollissement des matériaux de contact, entre 120 mV et 130 mV. La tension de contact atteint même brièvement la tension de fusion des matériaux pour la force de contact la plus faible ($F_c=3$ N). Les valeurs de rayons de contact R_{equ} des différentes forces F_c se rapprochent (Figure 4.38). Cela est dû au ramollissement des matériaux de contact qui lissent les aspérités des surfaces de contact qui étaient avant le ramollissement plus ou moins écrasées en fonction de F_c . De manière

plus globale, nous retrouvons le fait que l'augmentation de F_c diminue la résistance de contact, ce qui freine l'augmentation de la tension de contact et les échauffements associés.

Sur la Figure 4.37, pour une intensité crête $I_0=2000$ A, la caractéristique pour $F_c=12$ N atteint quasiment la tension de fusion avec une intensité maximum de 350 mV, la tension de fusion de nos matériaux étant fixée expérimentalement à 370 mV pour $I_0=2000$ A. Les deux autres forces $F_c=3$ N et $F_c=6$ N mènent à un plateau de fusion plus large, à partir de 1300 A pour $F_c=3$ N et 1750 A pour $F_c=6$ N. Les rayons de contacts associés (Figure 4.38) s'harmonisent, indépendamment de la force de contact F_c .

Courant limite de fusion

Dans le Tableau 2.1 du chapitre 2, nous avons extrait les valeurs théoriques du courant limite de fusion de l'Ag en fonction de F_c à partir d'un graphique publié dans [39]. En utilisant les résultats de l'Annexe E, pour les ondes de courant à $I_0=2000$ A, nous obtenons les courants limite de fusion expérimentaux résumés dans le Tableau 4.3. La valeur de 2200 A pour $F_c=12$ N a été calculée par extrapolation car plusieurs courbes UI n'ont pas atteint la tension de fusion à l'intensité crête $I_0=2000$ A.

Force F_c (N)	Courant limite de fusion théorique pour l'Ag (A)	Courant limite de fusion expérimental (A)	Différence relative (en %)
3	1500	1300-1400	7 à 13 %
6	2000	1700-1900	5 à 15 %
12	3000	1900-2200	27 à 37 %

TABLE 4.3 – Courants limites de fusion théoriques pour un contact en Ag selon [39] et expérimentaux en fonction de la force de contact statique F_c .

Les valeurs de courant limite que nous avons obtenues expérimentalement sont inférieures de 5 % à 15 % par rapport aux valeurs théoriques pour les forces $F_c=3$ N et $F_c=6$ N, ce qui reste cohérent. Cependant cette différence devient plus élevée pour $F_c=12$ N, avec un courant limite expérimental inférieur de 27 à 37 % par extrapolation par rapport au courant limite théorique. Ces écarts peuvent s'expliquer par la différence de matériaux de contact : Ag vs Ag pour les valeurs théoriques et AgC vs Ag pour nos essais.

Rapport I_f/a_f à la fusion

Lors de nos essais pour une décharge à $I_0=2000$ A, nous avons observé que le rayon de contact R_{equ} ne dépend pas de la force de contact, à partir du moment où la fusion du contact est atteinte. Ce phénomène est connu de la littérature et nous avons ainsi dans le chapitre 1 défini avec l'équation (2.8) la relation entre le rapport I_f/a_f , les caractéristiques du matériau de contact et les températures ambiante T_0 et de fusion du matériau T_f :

$$\frac{I_f}{a_f} = \frac{4\lambda_0}{\sqrt{L}} \arccos \left(\frac{T_0}{T_f} \right)$$

Ici nous avons deux, voire trois matériaux de contact en fonction de la dégradation du revêtement en Ag du CM : soit de l'AgC vs Ag, soit de l'AgC vs Ag et Cu. Dans le

Tableau 4.4, nous avons répertorié toutes les valeurs I_f/a_f trouvées dans la littérature. Tous les auteurs cités ont calculé ces valeurs à partir de résultats expérimentaux. En les comparant au rapport I_0/a de nos essais à $I_0=2000$ A, nous trouvons une valeur légèrement inférieure à celles de la littérature, mais qui reste tout à fait cohérente, notamment au vue de l'incertitude que nous avons sur le calcul numérique du rayon a (barres d'erreur visibles sur la Figure 4.11 et géométrie simplifiée du modèle).

Référence	Matériaux de contact	I_f/a_f (kA/mm)	I_0/a expé. (kA/mm)
Féchant [12]	<i>Ag</i> vs <i>Ag</i>	13,53	9,52
Féchant [25]	<i>Ag</i> vs <i>Ag</i>	13,33	
	<i>Cu</i> vs <i>Cu</i>	11,98	
	<i>AgCu10</i> vs <i>AgCu10</i>	11,49	
	<i>AgC3</i> perp. vs <i>AgC3</i> perp.	9,66	
	<i>Ag</i> vs <i>AgC3</i> perp.	10,98	
Dégot [40]	<i>Ag</i> vs <i>Ag</i>	13,88	
Hannachi [43]	<i>Ag</i> vs <i>Ag</i>	13,50	
	<i>Cu</i> vs <i>Cu</i>	13,00	

TABLE 4.4 – Comparaison entre les valeurs expérimentales du rapport I_f/a_f trouvées dans la littérature et la valeur expérimentale calculée lors de nos essais.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décidé de présenter nos résultats progressivement en ce qui concerne la complexité des phénomènes d'échauffement d'un contact statique. Nous avons ainsi débuté en analysant les échauffements se produisant dans un contact à surface constante, puis dans un contact où la surface évolue pendant le passage du courant électrique. L'étude de ces échauffements est primordiale pour notre problématique de collage. En effet, le collage potentiel se fait uniquement lorsque le matériau de contact dépasse sa température de fusion pendant l'essai. Le collage se produit si la force de séparation des électrodes n'est pas suffisante pour rompre la soudure.

Pour débiter ce chapitre, l'expérience menée sur la barre de cuivre avec un rétrécissement nous a permis de reproduire les résultats connus de la littérature lorsque la surface de contact ne varie pas et ne dépend pas du matériau.

Nous avons ensuite fait l'étude des échauffements dans le contact de coupure du disjoncteur modulaire, au travers de plusieurs types d'investigations :

- Des mesures électriques de tension et d'intensité de courant afin de tracer les caractéristiques UI du contact et de voir quelle zone d'échauffement ont atteint les matériaux de contact ;
- Des observations en microscopie optique et électronique pour visualiser et quantifier la dégradation des surfaces de électrodes après le passage de l'onde de courant ;

- Et des simulations pour compléter l'interprétation des courbes UI et pour déterminer plus précisément les rayons de contact réels.

Après la mise en contact de ses électrodes avec une force de contact statique F_c , chaque échantillon a subi deux décharges de courant identiques et d'intensité crête I_0 . Il n'y a pas eu de séparation des électrodes entre les deux décharges.

Nous avons dans un premier temps comparé les caractéristiques UI obtenues expérimentalement aux données de la littérature. Lors de la première décharge de courant, les cycles UI correspondent bien au comportement 1 décrit dans la littérature, et les cycles UI de la deuxième décharge au comportement 2. Grâce au modèle multiphysique, nous avons vérifié l'évolution du rayon de contact durant la première onde de courant. Nous avons également validé deux protocoles de calcul basés sur les mesures électriques pour définir le rayon de la surface de contact et la température de contact maximale atteinte lors de la décharge.

Nous avons dans un deuxième temps étudié l'influence des paramètres expérimentaux sur l'échauffement du contact, et ainsi défini quels sont les paramètres limites pour éviter la fusion des matériaux, donc leur potentiel collage. Cette étude a principalement été réalisée pour les comportements 1 du contact car c'est durant la première décharge de courant que les matériaux de contact sont le plus susceptibles de fondre. En effet pendant la première décharge, le rayon de contact augmente et il se passe des collages locaux par thermocompression ou une fusion globale du contact. La surface de contact soudée qui en résulte est ainsi plus élevée et diminue les échauffements lors de la deuxième décharge de courant. L'intensité de courant limite pour laquelle les matériaux de contact refusionnent est bien plus élevée que celle pour la première décharge et est difficilement atteinte en réalité.

Nous avons également vu dans ce chapitre que la force statique F_c joue un rôle important dans l'échauffement du contact lors de la première décharge de courant : plus elle est élevée lors de la mise en contact des électrodes, plus la surface de contact sera grande, ce qui diminue la résistance de contact à l'origine des caractéristiques UI et donc les échauffements du contact de manière plus générale. Pour les trois forces F_c testées, le courant limite de fusion est ainsi repoussé au fur et à mesure de l'augmentation de F_c :

- $I_{limite}=1300$ A à 1400 A pour $F_c=3$ N ;
- $I_{limite}=1700$ A à 1900 A pour $F_c=6$ N ;
- Et $I_{limite}=1900$ A à 2200 A pour $F_c=12$ N.

Pour conclure sur l'influence des paramètres expérimentaux dans l'échauffement du contact, nous pouvons souligner l'importance du couple (I_0, F_c) . Pour un matériau et une géométrie de contact donnés, la force de contact F_c initialise le rayon de la surface de contact. C'est ce rayon qui définit la résistance de contact, et donc la façon avec laquelle le contact s'échauffe lors du passage de l'onde de courant d'intensité crête I_0 . Si l'intensité

I_0 est assez élevée, les matériaux de contact peuvent atteindre leur température de fusion et se souder, ce qui peut mener à un collage du contact si la force de séparation des électrodes n'est pas suffisante pour rompre la soudure.

Chapitre 5

Étude du collage dynamique

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, le collage dynamique peut être le résultat de plusieurs modes de soudure : amorçage préalable et/ou rebond lors de la fermeture et/ou auto-ouverture du contact par répulsion. Nous nous focalisons ici sur le cas d'un rebond à la fermeture car c'est le mode de soudure dynamique qui est le plus courant dans le produit de protection retenu pour ces travaux de thèse. Le gabarit « contact électrique dynamique » décrit au chapitre 3 reproduit pour cette étude la fermeture brusque du produit sur défaut électrique existant. Les moyens de diagnostics associés sont variés : mesures électriques, mécaniques et optiques et analyse des surfaces de contact après essai.

Dans ce chapitre nous décrirons le protocole de test utilisé avec notamment le choix du nombre de test par échantillon. Nous détaillerons et expliquerons ensuite les cycles UI caractéristiques obtenus lors de ces essais en nous aidant des résultats du chapitre précédent sur l'étude en statique. Nous nous appuierons notamment sur le modèle simplifié qui permet aussi de simuler les essais en dynamique, afin de mieux expliquer les caractéristiques des cycles UI obtenus, mais également vérifier si la tension et la température de contact calculées satisfont à nouveau la formule de Kohlrausch. Nous poursuivrons ce chapitre en présentant les forces de collage mesurées et comment elles sont influencées par la contrainte thermique imposée par l'arc lors du rebond. Nous donnerons pour clore ce chapitre un aperçu de l'influence des matériaux de contact sur les forces de collage mesurées. Nous utiliserons pour cela les résultats des mesures optiques et des analyses matériaux.

5.1 Protocole de test

Avant de débiter la campagne de tests sur l'équipement « contact électrique dynamique », nous avons dû faire le choix de l'intensité de courant à faire passer dans les contacts, du nombre d'échantillons testés et du nombre d'essais à réaliser sur un même échantillon. Après des essais préliminaires, nous avons retenu les éléments suivants :

5.1.1 Intensité du courant

La source de courant utilisée est la même que celle pour l'étude sur le collage statique. Elle permet de générer des ondes de courant assimilables à des demi-ondes sinusoïdales 50 Hz sur leur front montant. Cette fréquence a été retenue pour pouvoir mieux comparer ces résultats à ceux de l'étude sur le collage statique et également pour conserver une fréquence assez faible pour favoriser les conditions de régime thermoélectrique quasi-statique. Pour étudier l'influence de l'énergie apportée par l'arc pendant le rebond, à durée de rebond supposée constante, nous avons choisi d'utiliser trois intensités maximales croissantes (1400 A, 2400 A et 3300 A) correspondant à trois intensités moyennes d'arc pendant le rebond (120 A, 210 A et 310 A). La Figure 5.1 donne un exemple des évolutions temporelles de l'intensité de l'onde de courant et de la tension mesurée aux bornes du contact, pour $I_2 = 210$ A.

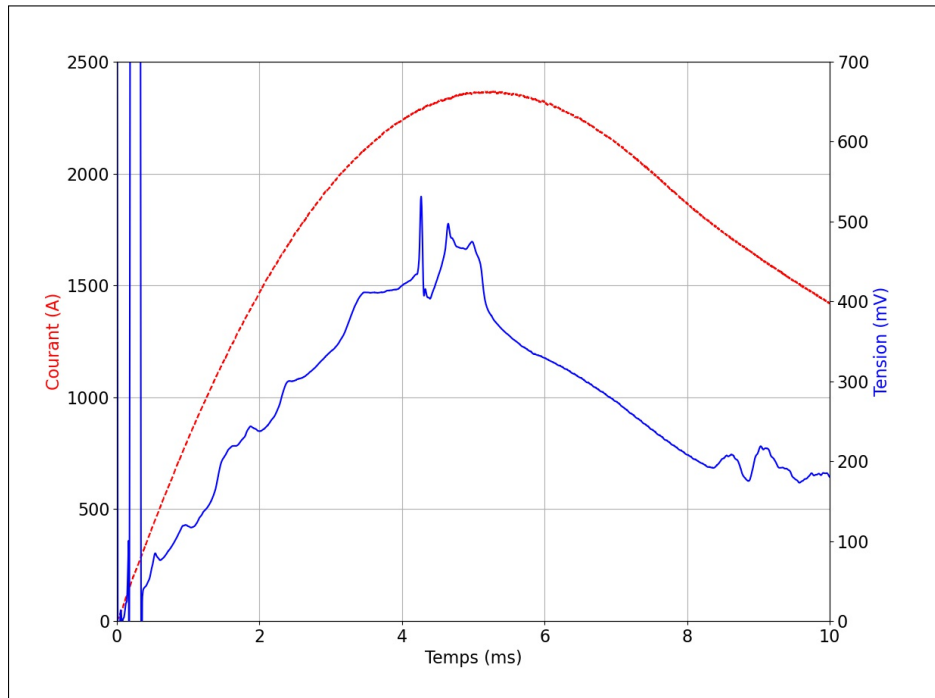


FIGURE 5.1 – Évolutions temporelles de l'intensité du courant de décharge et de la tension mesurée aux bornes du contact pour une intensité moyenne de courant d'arc de $I_2=210$ A.

5.1.2 Nombre d'échantillons et nombre d'essais par échantillon

L'état de surface des électrodes de contact joue un rôle important dans la résistance au collage dynamique du contact (cf explications de la Figure 2.14 au chapitre 2). Un contact neuf ou un contact dont les surfaces ont été limées développent une force de collage plus importante qu'un contact déjà utilisé par plusieurs arcs. Néanmoins dans notre cas au vu de la mise en place des contacts, des amenées de courant et des fibres optiques, le changement de contact ou le limage des contacts entre chaque essai serait très chronophage. Nous avons donc choisi de réaliser 10 essais successifs sur chaque contact. Le temps entre chacun des essais est au minimum de cinq minutes afin de permettre le retour à l'équilibre thermique. Pour avoir une statistique suffisante, cinq échantillons ont

été testés pour chacune des trois intensités de courant testées.

Le Tableau 5.1 résume les échantillons testés. Pour l'intensité la plus élevée, il a été difficile de réaliser successivement 10 essais sur le même échantillon. En effet aux alentours du pic de courant, les forces de répulsion ajoutées aux instabilités mécaniques du contact ont facilement tendance ouvrir le contact. Cette auto-ouverture crée un arc qui détruit totalement les électrodes, ce qui rend impossible d'autres essais sur le même contact. Pour les échantillons testés à l'intensité I_3 , nous avons donc les deux premiers qui ont subi 10 essais sans destruction, et les trois autres qui ont été détruits pendant le numéro d'essai indiqué en orange entre parenthèses.

I_1 (120 A)	I_2 (210 A)	I_3 (310 A)
210323-01	210323-02	210325-01
210325-02	210326-01	210401-03
210326-02	210330-01	210324-01 (6)
210326-03	210330-03	210324-03 (10)
210329-04	210331-01	210401-02 (7)

TABLE 5.1 – Numéros des échantillons testés avec leur intensité moyenne de courant de l'arc de rebond. Tous les échantillons ont été testés 10 fois sauf les trois derniers échantillons pour I_3 qui ont été détruits par un arc d'auto-ouverture avant la fin des 10 essais. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'essais réalisés, y compris celui où la destruction a eu lieu.

La réalisation de 10 essais successifs sur le même contact pose la question de la répartition des pieds d'arc sur les électrodes. Est-ce que l'arc apparait toujours au même endroit de la surface de contact, avec dans ce cas l'influence de l'usure de la surface ? Ou bien l'arc apparaît-il un peu plus loin sur une surface encore vierge qui peut être considérée comme une électrode neuve ? Lors de nos observations 3D des contacts fixes au microscope optique, nous avons vu qu'une grande majorité des arcs se produisent au même endroit. Toutes intensités d'arc de rebond confondues, seules environ 10 % des traces d'arcs de rebond semblent être décalées par rapport aux autres traces sur le même échantillon. La Figure 5.2 donne un exemple de ces observations pour deux contacts mobiles testés 10 fois à l'intensité I_2 . Sur le contact fixe de gauche, les pieds des 10 arcs semblent avoir été au même endroit alors que sur l'image de droite les pieds semblent s'être accrochés à plusieurs endroits, peut-être l'accrochage s'est-il décalé d'un essai à l'autre ?

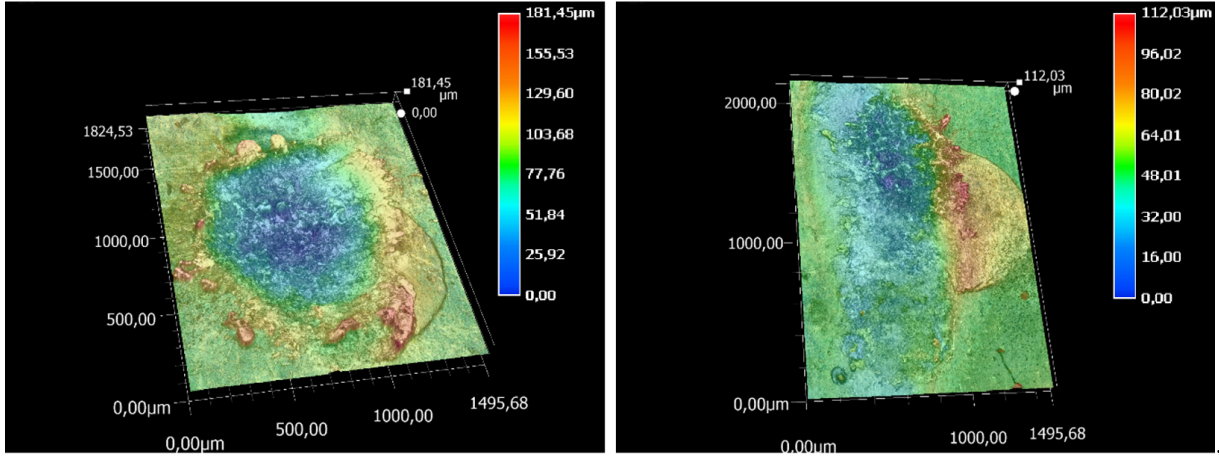


FIGURE 5.2 – Exemple de deux contacts fixes ayant subi 10 essais successifs à l'intensité I_2 . Images en 3D observées au microscope optique (assemblage d'images en grandissement x500) avec une échelle de couleurs correspondant à la hauteur du pixel de l'image. L'échantillon de gauche est le 210326-01 et l'échantillon de droite le 210323-02.

5.2 Caractéristiques UI lors de la fermeture

5.2.1 Étapes temporelles sur les caractéristiques UI

Comme indiqué dans la partie précédente sur le protocole de test, les ondes de courant utilisées pour l'échauffement du contact ont la même allure que celles utilisées pour l'étude en statique. Ce choix a été fait afin de comparer plus facilement les résultats de ce gabarit dynamique avec les conclusions de l'étude sur le collage statique. La Figure 5.3 et la Figure 5.4 représentent les 10 courbes UI typiques correspondant aux 10 essais successifs sur un même échantillon, ici pour des intensités moyennes de courant d'arc de 120 A et 210 A. Il est à noter que dans un souci de clarté la fin des courbes n'est pas tracée sur les graphiques de ce chapitre.

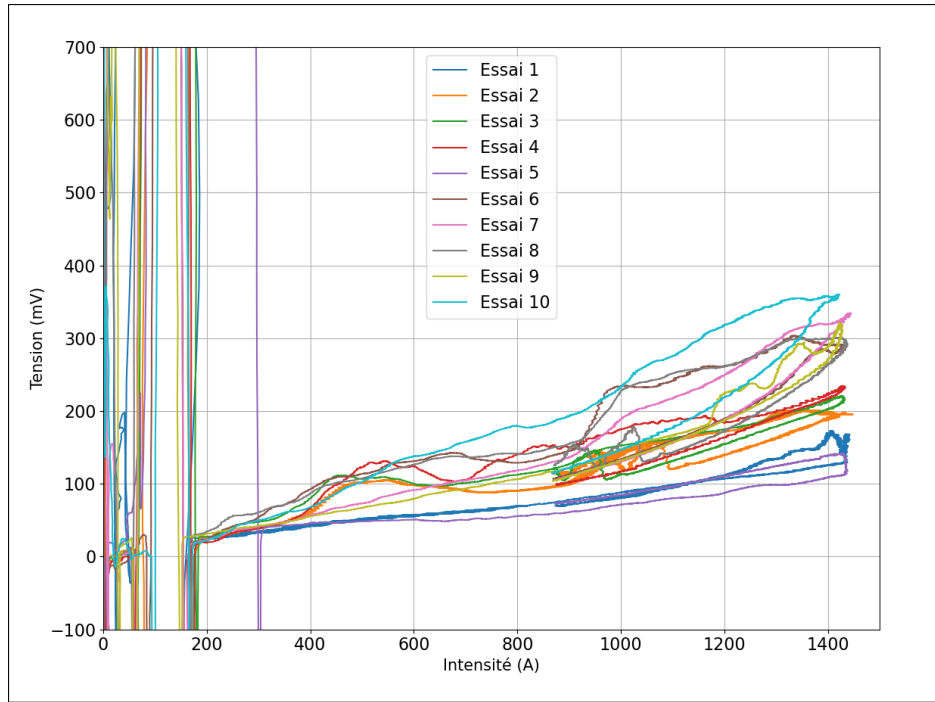


FIGURE 5.3 – Courbes UI obtenues lors des 10 essais successifs effectués sur l'échantillon 20210325-02 pour une même onde de courant menant à une intensité moyenne de courant d'arc de $I_1=120$ A.

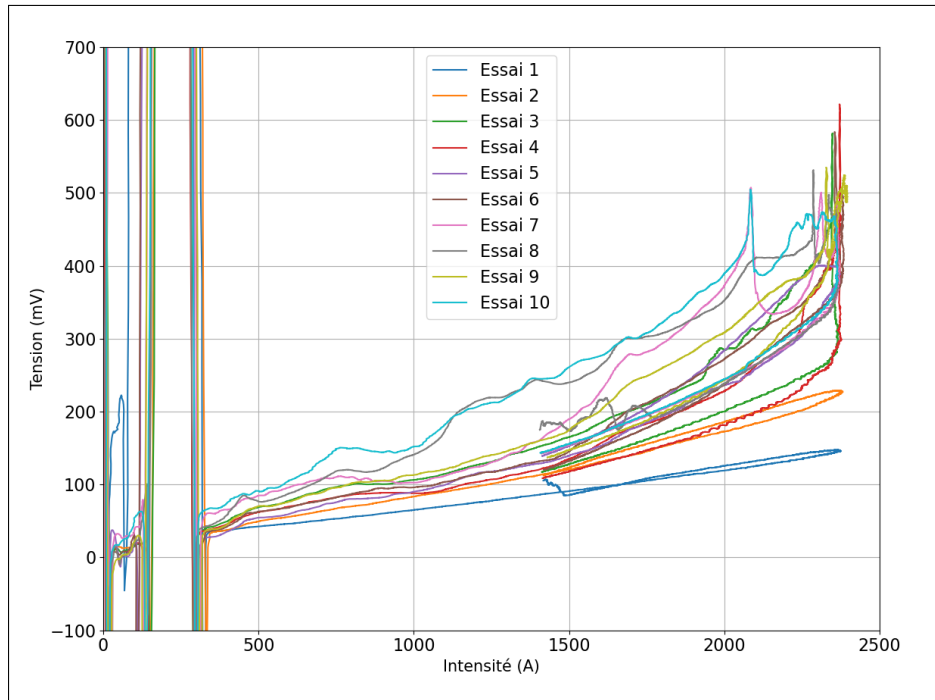


FIGURE 5.4 – Courbes UI obtenues lors des 10 essais successifs effectués sur l'échantillon 20210326-01 pour une même onde de courant menant à une intensité moyenne de courant d'arc de $I_2=210$ A.

Le déroulement d'un essai sur le gabarit « contact électrique dynamique » suit plusieurs étapes que nous allons détailler dans les sections suivantes.

Claquage électrique

Pendant la phase de rapprochement du contact mobile (CM) vers le contact fixe (CF), nous pouvons observer sur la quasi-totalité des tests un bref claquage électrique dont l'impact thermique est négligeable juste avant le premier contact des électrodes. Ce claquage se traduit par une tension supérieure au volt au moment du début de la décharge de courant. Il est légèrement visible sur les courbes de la Figure 5.3 et de la Figure 5.4 qui sont presque confondues avec l'axe des ordonnées. Son impact thermique sur le contact sera pris en compte dans nos calculs au même titre que celui de l'arc de rebond, même si l'énergie de claquage est ici négligeable vu ses faibles durée et intensité de courant.

Premier contact et rebond

En considérant les contacts ayant un rebond, leurs électrodes se heurtent l'une à l'autre pendant leur premier contact d'une durée moyenne de $0,158 \pm 0,058$ ms. Ce premier contact est caractérisé sur les courbes UI de ce chapitre par une tension de contact inférieure à 50 mV. Puis le rebond mécanique apparaît avec l'arc de rebond qui induit une tension d'environ 12 V sur les cycles UI pendant $0,166 \pm 0,062$ ms en moyenne. Durant l'ensemble des essais, nous avons veillé à ajuster la hauteur de lâcher du CM pour répéter au mieux les durées de premier contact et d'arc de rebond. Les variations ne sont néanmoins pas négligeables, avec parfois même des essais sans rebond. Cela est dû à la difficulté d'ajustage de la hauteur de lâcher, mais également aux caractéristiques des matériaux de contact qui sont modifiées au fur et à mesure des essais (usure de la surface, modifications des paramètres mécaniques des matériaux liés à la contrainte thermique imposée par l'arc). Nous tiendrons compte des variations de durées et de leur impact dans les analyses de ce chapitre.

Il est à noter que les pics de tension visibles sur toutes les caractéristiques UI de cette partie au moment du claquage et au début et à la fin de l'arc de rebond ne sont en réalité pas présents dans l'évolution de la tension de contact. Ce sont des artéfacts liés à l'activation et à la désactivation de l'écrêteur qui évite d'endommager la sonde de tension avec la tension de charge des condensateurs et avec la tension de l'arc de rebond.

Cycles UI de comportements 1 et 2

Pour chaque tir, une fois le rebond terminé, les électrodes se referment et il s'en suit une courbe UI caractéristique soit d'un comportement 1 (le palier de fusion peut être atteint) soit d'un comportement 2 (le palier de fusion n'est pas atteint), telles que nous les avons décrites dans l'étude du collage statique. Avec ce gabarit les cycles UI sont néanmoins moins stables que les cycles obtenus avec le gabarit « contact électrique statique ». Cela est dû notamment à l'altération des surfaces de contact par l'arc de rebond et à la force de contact qui oscille à la suite de l'impact du CM sur le CF. Nous verrons dans la section suivante les caractéristiques menant à ces comportements 1 et 2.

Sur certaines caractéristiques UI présentées dans ce chapitre pour une intensité I_2

(Figure 5.4 et Figure 5.7), la tension oscille fortement autour de la valeur de la tension de fusion trouvée au chapitre précédent lors des tests en statique, de l'ordre de 370 mV à 390 mV en fonction de l'intensité crête I_0 . Même si les raisons de ces fortes oscillations sont difficiles à connaître, elles font penser à des cycles successifs d'allongements et de ruptures du pont fondu entre les deux électrodes. L'hypothèse la plus probable pour expliquer ces fortes oscillations dès le début du plateau de fusion est un état de surface des électrodes dégradé (usure importante, bourrelets visibles sur les bords des surfaces de contact à la Figure 5.2, couche d'oxydes dues à l'arc) couplé à des oscillations microscopiques de la force de contact dû aux instabilités mécaniques du système. Les oscillations sont également présentes sur certaines caractéristiques UI pour l'intensité I_3 autour d'une tension moyenne d'environ 420 mV, comme l'illustre la Figure 5.8 mais ne sont pas visibles sur les résultats que nous avons eu pour l'intensité I_1 , sûrement étant donné l'intensité de courant bien plus faible pendant ces essais qui ne permet pas d'obtenir l'allongement du pont fondu.

Revenons maintenant sur les tensions moyennes de fusion des cycles UI pour I_1 , I_2 et I_3 en dynamique et comparons-les avec celles trouvées pendant l'étude en statique. Les caractéristiques UI pour I_1 n'atteignent généralement pas le palier de fusion du contact (cf Figure 5.3). Seul un échantillon sur les cinq a permis d'avoir des courbes atteignant le palier de fusion à une tension d'environ 380 mV. Pour une intensité d'arc I_2 , tous les échantillons mènent à des cycles ayant un palier de fusion compris entre 390 mV et 420 mV, comme les exemples de la Figure 5.4 et de la Figure 5.7. Nous retrouvons donc une tension de fusion semblable pour I_1 et légèrement plus élevée pour I_2 à celle obtenue en statique (de l'ordre de 370 mV à 390 mV pour le contact statique). Cependant, ce n'est pas le cas pour l'intensité I_3 avec des tensions de fusion globalement plus élevées pour l'ensemble des essais ayant mené à la fusion lors de notre campagne d'essai. Nous avons ainsi observé des paliers de fusion à des tensions allant de 400 mV à 550 mV. Sur l'exemple de la Figure 5.8, les paliers de fusion sont de l'ordre de 450 mV à 550 mV, le palier de fusion théorique du cuivre uni-matériau étant représenté comme référence en ligne pointillée à 420 mV.

Pour cette partie en dynamique, sur l'ensemble des cycles UI atteignant la fusion pour l'intensité I_3 :

- Environ un tiers marquent un palier à 420 mV avant de continuer à augmenter en subissant des oscillations de tension comme l'essai 9 de la Figure 5.5 et les essais 3 et 4 de la Figure 5.8 ;
- Un autre tiers de ces courbes UI en comportement 1 augmentent, sans marquer de palier vers 420 mV, et subissent de vives oscillations de tension comme les essais 7 et 8 de la Figure 5.5 ;
- Et le dernier tiers de ces courbes est spécifique à un échantillon et est illustré à la Figure 5.6. Pour ce contact, les paliers de fusion sont assez stables aux environs de 470 mV, sans marquer de palier à 420 mV.

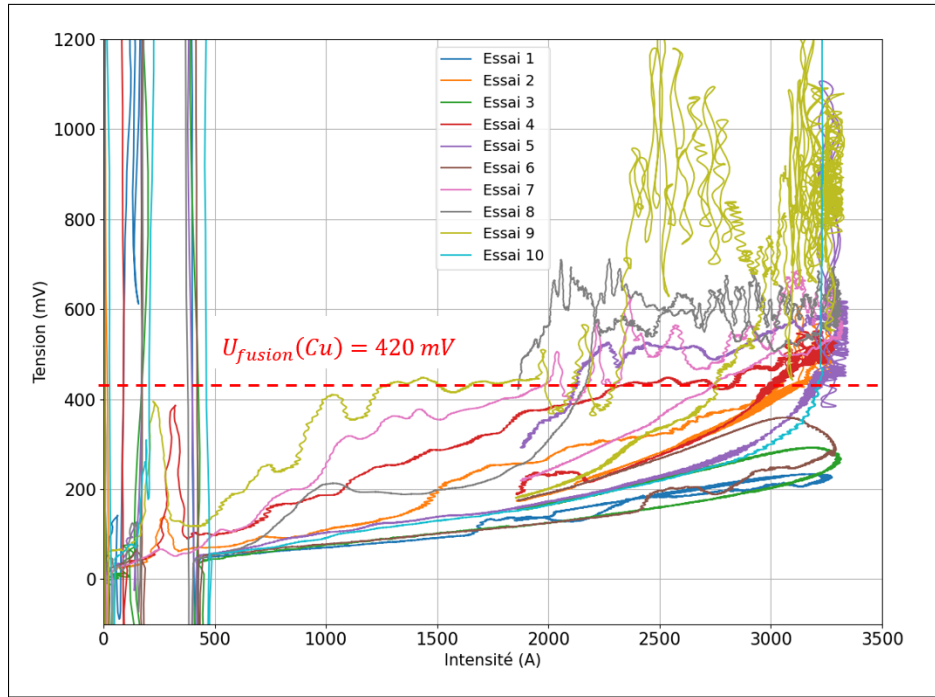


FIGURE 5.5 – Courbes UI obtenues lors des sept essais successifs effectués sur l'échantillon 20210324-03 pour une même onde de courant menant à une intensité moyenne de courant d'arc de $I_3=310$ A. Le maximum de l'échelle de tension est augmenté pour l'intensité I_3 par rapport aux intensités I_1 et I_2 pour visualiser correctement les instabilités de tension et la montée verticale de la courbe vers la tension d'arc qui est supérieure à 10 V.

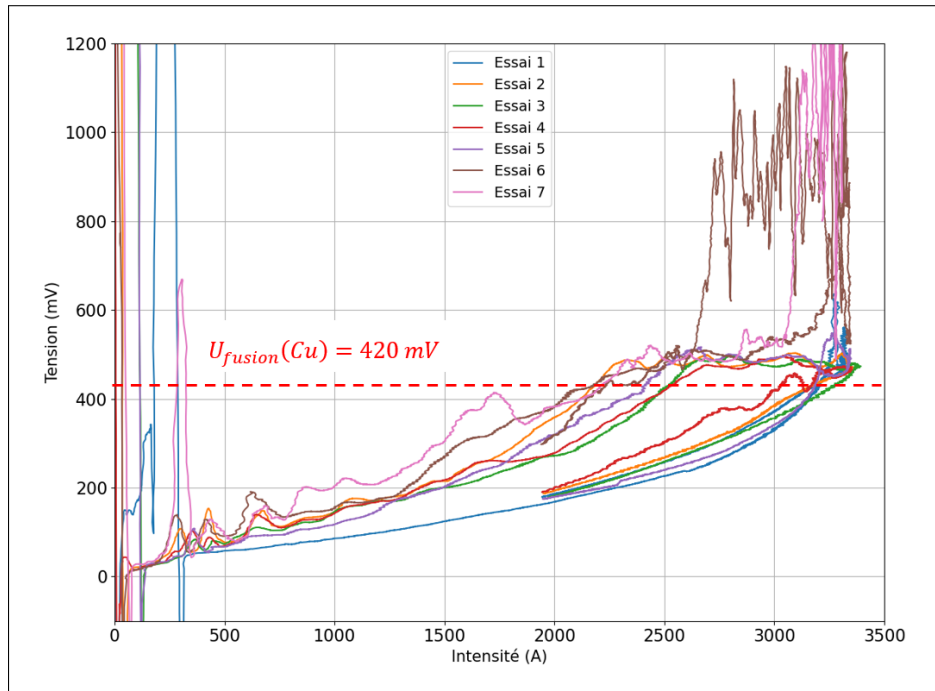


FIGURE 5.6 – Courbes UI obtenues lors des sept essais successifs effectués sur l'échantillon 20210401-02 pour une même onde de courant menant à une intensité moyenne de courant d'arc de $I_3=310$ A.

Pour expliquer ces valeurs de tension de fusion élevées, la question des matériaux

en contact se pose. En effet d'après la formule de Kohlrausch, la tension de fusion est dépendante du matériau en fusion. Nous pouvons ici faire l'hypothèse d'une proportion plus importante de cuivre provenant du CM et qui augmenterait la tension de fusion du contact, comme notre hypothèse pour le contact en statique à $I_0=2800$ A. Néanmoins même si un pourcentage de cuivre plus important dans le bain de fusion pourrait mener à des tensions plus élevées, cette hypothèse n'explique pas les niveaux de tension de fusion supérieurs à 420 mV, la tension de fusion du contact Cu vs Cu .

De manière plus générale, les caractéristiques UI mesurées en dynamique sont plus perturbées que celles pour le contact statique, que ce soit avant ou pendant le palier de fusion. En effet les variations de force pendant l'essai ainsi que la dégradation des surfaces de contact par l'arc de rebond influent sur la stabilité mécanique du contact, et donc sur son comportement électrique. Pour expliquer les allures de tensions au-delà d'une intensité de courant de 2000 A pour les essais à I_3 , nous pouvons faire plusieurs hypothèses :

- Les fortes oscillations de tensions (Figure 5.5, Figure 5.6 et Figure 5.8) sont probablement dues à la dégradation des surfaces de contact à cause de l'arc et des essais successifs : rugosité modifiée, formation de bourrelets et dépôts d'oxydes. La surface réelle de contact est fragilisée et le moindre mouvement des supports de contact, ou le mouvement relatif entre les supports et les électrodes fait s'allonger le pont fondu ;
- Les plateaux de fusion des essais 2 à 5 de la Figure 5.6 sont relativement constants à une tension de 470 mV. Cette caractéristique, spécifique à cet échantillon, a sûrement été assurée par la mise en place de nouveaux supports de contact qui ont mieux maintenus les électrodes ;
- Les valeurs élevées de tension moyenne de fusion peuvent correspondre à un bain de fusion constitué des matériaux de contact, mais également d'oxydes ou de contaminations qui augmenteraient la tension de fusion de l'alliage des matériaux de contact. Dans cette hypothèse, l'impact d'une augmentation de la proportion de Cu dans le bain fondu pourrait être négligeable devant l'impact de la présence d'oxydes ou de contamination ;
- La topologie du contact est aussi peut-être différente du cas du contact en statique dans la mesure où le choc de la fermeture crée l'éjection de matière et une déformation plus importante de la surface de contact.

Enfin, lors de la phase ascendante de l'onde de courant, nous avons observé sur certains essais de comportement 1 des « bosses » dans l'évolution de la tension de contact. La Figure 5.7 illustre nettement ce phénomène pour des intensités d'environ 1150 et 1550 A. Nous en expliquerons également l'origine dans la suite de ce chapitre.

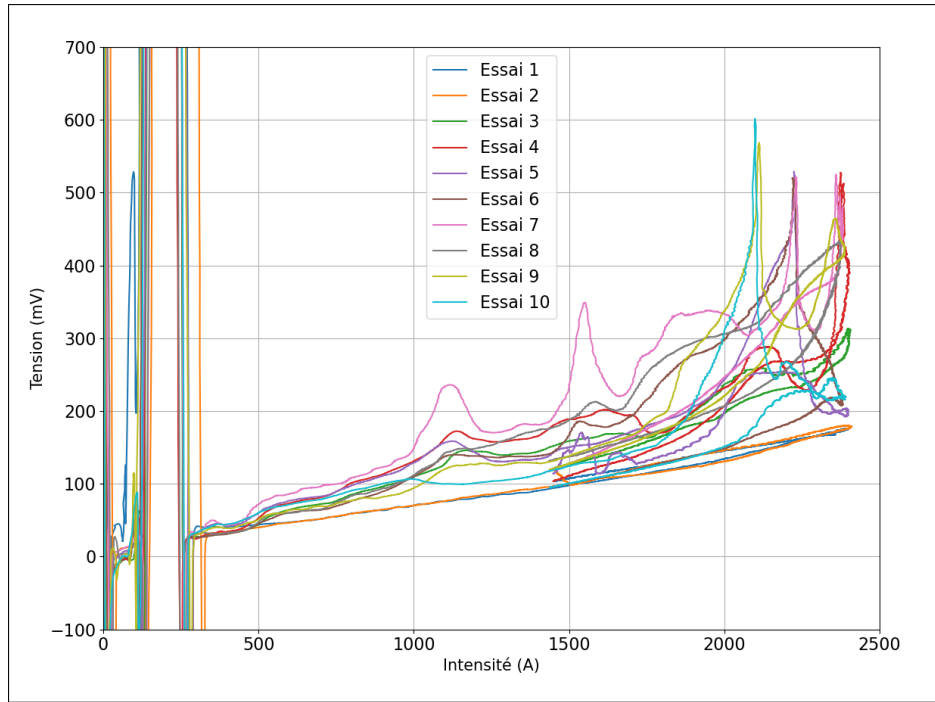


FIGURE 5.7 – Exemple de « bosses » observées sur l'évolution de la tension de contact à environ 1150 et 1550 A lors des 10 essais successifs réalisés sur l'échantillon 210331-01 pour une intensité moyenne de courant d'arc de $I_2=210$ A.

Cas particulier de l'auto-ouverture

La Figure 5.8 présente le cas particulier d'une auto-ouverture du contact lors de l'essai 6. Sur cet échantillon l'essai 4 présente déjà des pics successifs de tension correspondant à des instabilités du pont fondu telles que décrites dans l'état de l'art sur le collage statique dans le chapitre 2, sans qu'il n'y ait de départ en arc. L'essai 6 présente également des instabilités à partir de 1900 A, mais ici le pont fondu rompt en laissant place à un arc vers 2300 A avec une tension de contact qui augmente verticalement vers la tension d'arc qui est supérieure à 10 V. Grâce à la formule (1.19) du chapitre 1, nous estimons les forces de répulsion à 2.54 N pour 2300 A. La force de contact totale mesurée à ce moment-là étant positive (environ 5.0 N), ce n'est pas uniquement le phénomène de répulsion qui est à l'origine de l'auto-ouverture du contact. Cette fragilité du contact est principalement due à son instabilité mécanique (mouvement relatif des deux électrodes) et dépend fortement de la manière dont le contact s'est reformé à la fin du rebond.

Les cas particulier d'auto-ouverture ne seront pas d'avantage détaillés dans ce manuscrit car nous resterons concentrés sur l'étude du collage dynamique dû au rebond à la fermeture. De plus lors de ces essais avec auto-ouverture, l'arc créé détruit complètement les électrodes de contact, rendant impossible la mesure de force de collage qui est fondamentale pour notre analyse.

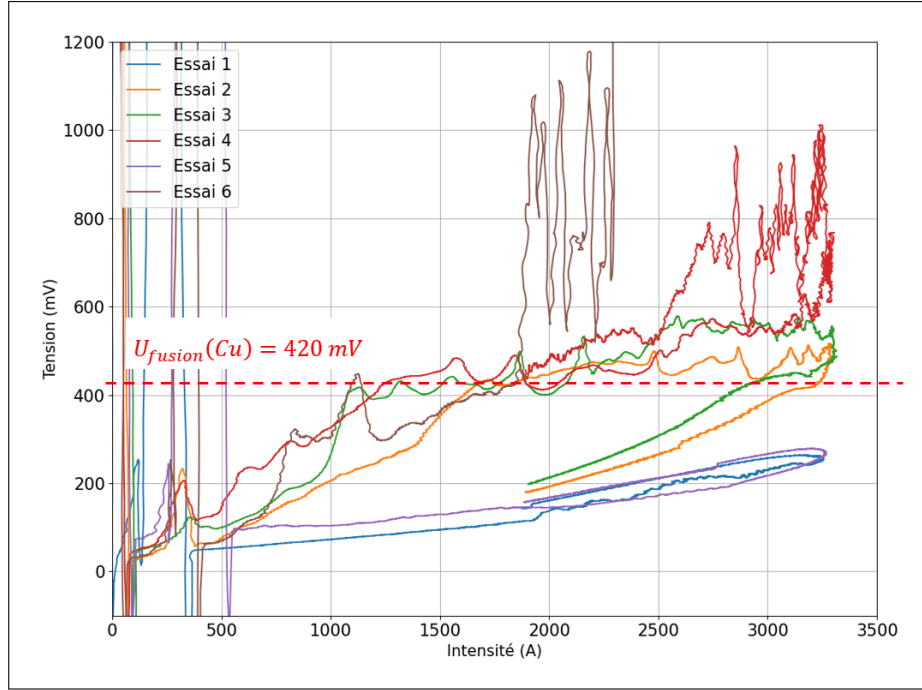


FIGURE 5.8 – Exemple de départ en arc lors du sixième essai réalisé sur l'échantillon 210324-01. Le courant d'arc moyen est d'environ $I_3=310$ A pour les essais avec rebond et le départ en arc se fait ici à environ 2300 A.

5.2.2 Critères menant aux comportements électriques 1 ou 2

Lors des essais en dynamique nous avons observé des comportements 1 et 2 sur les caractéristiques UI quels que soit l'échantillon testé ou l'intensité de courant injectée. Telle que décrite dans l'étude sur le collage statique, l'origine de cette différence de comportement est la taille de la surface réelle de contact. Si elle est suffisamment élevée, le contact subira moins d'échauffement et aura un comportement 2.

Présence d'un rebond

Vu que nous n'avons pas eu de rebond mécanique sur certains essais, nous avons d'abord voulu vérifier une hypothèse : est-ce uniquement la présence de l'arc lors du rebond qui augmente significativement la taille de la surface de contact, et donc mène à un comportement 2 ? Nous avons pour cela calculé pour chaque échantillon le pourcentage d'essais avec un rebond et suivi d'une caractéristique UI de comportement 2 selon la formule (5.1) :

$$\%_{comp. 2 \text{ après rebond}} = \frac{\text{nombre de comportements 2 après un rebond}}{\text{nombre d'essais avec rebond}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau 10. Nous pouvons y voir qu'après un rebond, les pourcentages d'essais qui ont un comportement 2 sont très dispersés d'un échantillon à l'autre. Il n'y a pas de tendance qui permettent d'affirmer la dépendance directe entre la présence d'un rebond et la survenue d'un essai en comportement 2.

	I_1 (120 A)	I_2 (210 A)	I_3 (310 A)
Échantillons (% de comportements 2 après un rebond)	210323-01 (40 %)	210323-02 (ø rebond)	210325-01 (13 %)
	210325-02 (20 %)	210326-01 (30 %)	210401-03 (90 %)
	210326-02 (10 %)	210330-01 (86 %)	210324-01 (67 %)
	210326-03 (56 %)	210330-03 (30 %)	210324-03 (83 %)
	210329-04 (67 %)	210331-01 (20 %)	210401-02 (100 %)

TABLE 5.2 – Pourcentage de tests ayant un comportement 2 après un rebond, pour chaque échantillon testé.

Contrainte thermique de l'arc de rebond

La bibliographie existante sur l'étude du collage dynamique dû au rebond à la fermeture nous a appris l'importance de l'énergie de l'arc de rebond pour quantifier la force de collage dynamique : plus l'énergie de l'arc est élevée, plus la force de collage sera importante. Nous avons également vu avec l'équation (1.20) du chapitre 1 que pour un matériau de contact donné, la force de collage dépend uniquement de la surface soudée. Nous pouvons donc faire le lien entre énergie de l'arc et surface soudée : plus l'énergie de l'arc est importante, plus la surface soudée à la fin de l'arc sera grande, et donc plus le cycle UI de l'essai aura de chance d'être en comportement 2 selon nos résultats de l'étude statique du chapitre précédent.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons tracé la répartition en comportement des essais successifs sur les échantillons de chaque intensité de courant d'arc en fonction de la contrainte thermique imposée I^2t par l'arc. Les graphiques sont présentés en Figure 5.9, Figure 5.10 et Figure 5.11. Une contrainte thermique proche de zéro signifie qu'il n'y a pas eu de rebond lors de cette essai, uniquement un claquage dont la contrainte thermique reste négligeable comparée à celle de l'arc de rebond.

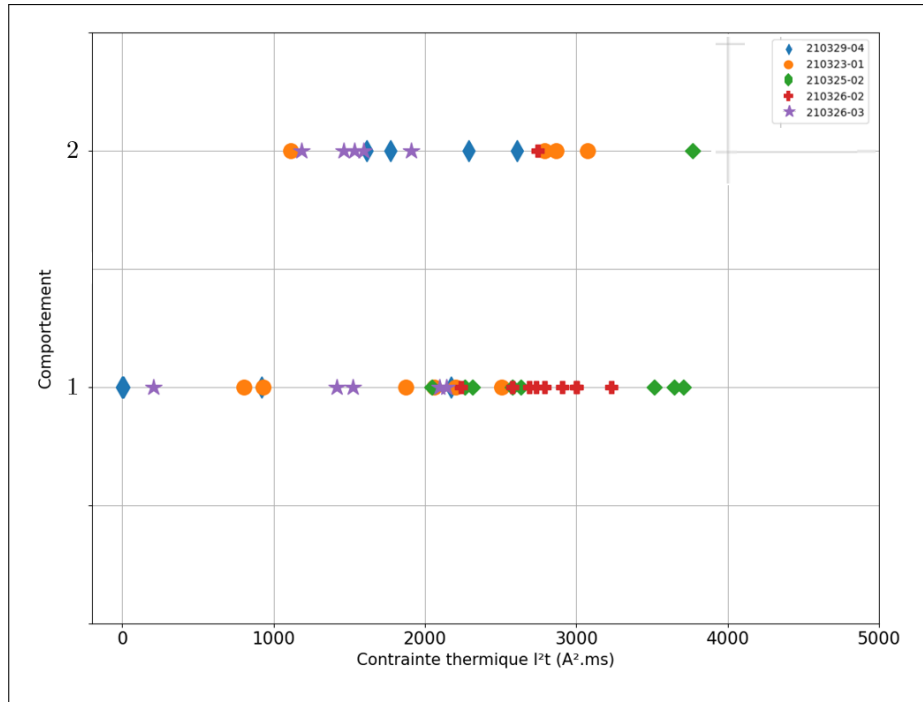


FIGURE 5.9 – Répartition des 10 essais selon leur comportement électrique en fonction de la contrainte thermique imposée par l'arc de rebond. Graphique pour les cinq échantillons menant à l'intensité moyenne de courant d'arc $I_1=120$ A.

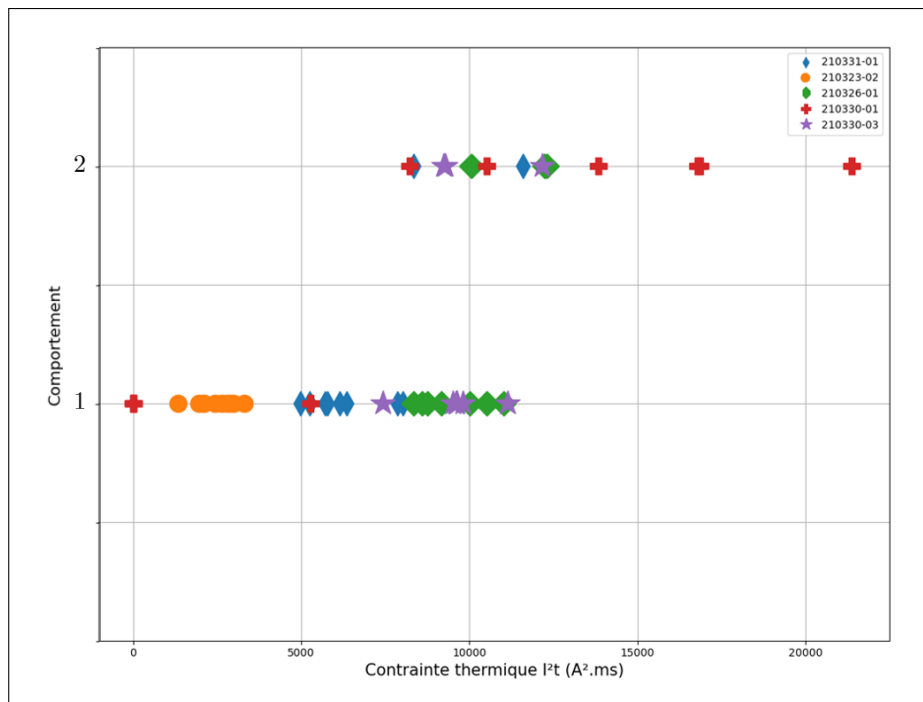


FIGURE 5.10 – Répartition des 10 essais selon leur comportement électrique en fonction de la contrainte thermique imposée par l'arc de rebond. Exemple pour les cinq échantillons menant à l'intensité moyenne de courant d'arc $I_2=210$ A.

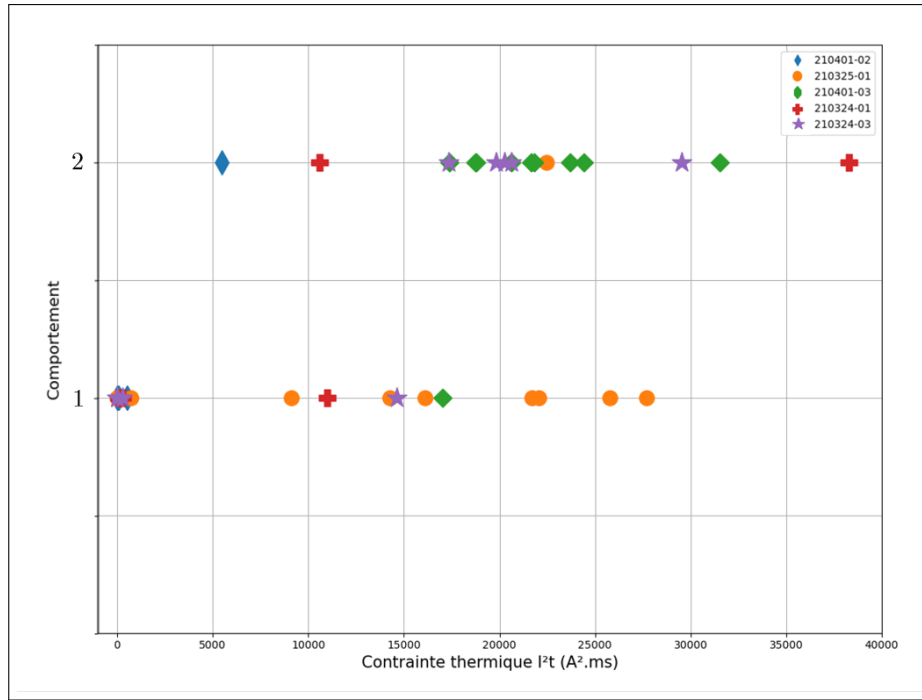


FIGURE 5.11 – Répartition des essais selon leur comportement électrique en fonction de la contrainte thermique imposée par l'arc de rebond. Graphique pour les cinq échantillons menant à l'intensité moyenne de courant d'arc $I_3=310$ A.

Dans la littérature du collage dynamique, c'est le plus souvent l'énergie de l'arc de rebond qui est mesurée pour son influence sur la force de collage selon l'équation (5.2) :

$$E_{arc} = \int_{t_i}^{t_f} U_{arc} \cdot I_{arc} dt \quad (5.2)$$

Avec t_i et t_f les instants de début et de fin de l'arc de rebond.

Dans notre cas, la tension de l'arc de rebond n'a pas été mesurée de manière précise car elle a été écrêtée pour protéger la sonde différentielle en calibre x1 (max $\pm 6,5$ V). Nous n'avons qu'une mesure approximative effectuée avec la deuxième sonde différentielle en calibre x100 et qui nous donne une tension d'arc de l'ordre de 11 à 13 V. Pour approximer l'énergie de l'arc, c'est donc la contrainte thermique I^2t qui a été calculée à partir de l'équation (5.3). Cette contrainte thermique, image de l'énergie de l'arc, est largement utilisée dans les documents normatifs des produits de protection pour quantifier leur résistance face à des intensités de courant de court-circuit.

$$I^2t_{arc} = \int_{t_i}^{t_f} i_{arc}^2 dt \quad (5.3)$$

Sur la Figure 5.10, nous pouvons voir que pour chaque échantillon testé à I_2 , une contrainte thermique plus élevée a tendance à faire basculer l'essai d'un comportement 1 à un comportement 2. Cette tendance est moins nette pour les intensités I_1 et I_3 . La contrainte thermique semble être un critère qui définit le comportement des courbes

UI après le rebond. Cependant avec ces trois graphiques, nous ne pouvons pas définir une valeur limite franche $I^2 t_{arc}$ qui ferait basculer l'ensemble des échantillons de chaque intensité d'un comportement 1 à un comportement 2. Nous pouvons expliquer cela par la probable concomitance de plusieurs paramètres. D'un essai à l'autre sur le même contact, une même contrainte thermique de l'arc de rebond pourra mener à un comportement 1 ou 2 selon :

- L'état de surface qui peut être dégradé par l'arc de rebond : modification de la rugosité, bourrelets de matière fondue par l'arc et solidifiée, production d'oxydes qui réduisent la surface de contact ;
- Le potentiel mouvement du pied d'arc qui propagerait de manière plus diffuse la chaleur de l'arc aux électrodes.

C'est en fait un ensemble de paramètres qui influe sur la taille de la surface réelle de contact à la fin de l'arc de rebond, et donc sur le comportement adopté par la caractéristique UI de l'essai.

5.2.3 Bosses dans l'évolution de la tension de contact

Nous avons observé sur certaines caractéristiques UI des « bosses » dans l'évolution de la tension de contact, comme l'exemple de la Figure 5.7. Ces « bosses » ne se produisent que pour les essais en comportement 1, c'est-à-dire lorsque la contrainte thermique de l'arc est assez faible et que la surface réelle de contact est donc également relativement petite.

Si nous reprenons maintenant l'équation (1.4) ($a = \sqrt{\frac{F}{\xi \cdot \pi \cdot H}}$) qui relie le rayon de la surface de contact à la force de contact, nous pouvons faire l'hypothèse que ces « bosses » de tension de contact proviennent d'une diminution de la surface de contact à cause d'une diminution dans l'évolution temporelle de la force de contact. En effet comme nous l'avons déjà évoqué, la force de contact mesurée par le capteur de force piézométrique oscille de façon pseudo-périodique à la suite du choc entre le CM et le CF. Ces « bosses » de tension seraient donc le résultat de la combinaison entre un faible rayon de contact a à la fin du rebond et une diminution de la force de contact. Le schéma de la Figure 5.12 synthétise cette hypothèse avec les conditions menant à la présence de « bosses » dans l'évolution de la tension de contact.

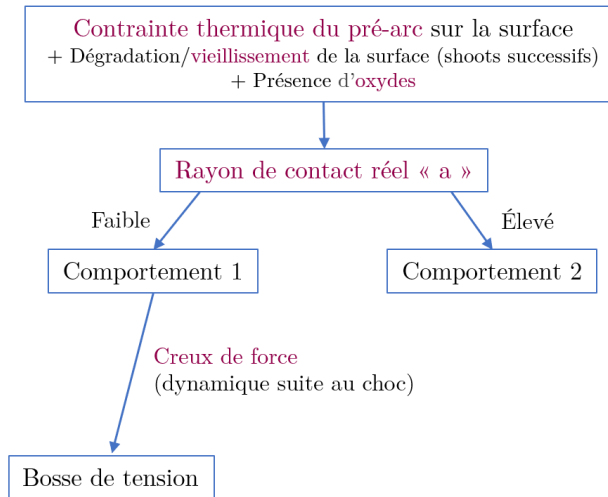


FIGURE 5.12 – Schéma synthétisant les hypothèses menant à la présence de « bosses » dans l'évolution de la tension de contact.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons tracé pour chaque échantillon les évolutions temporelles de la tension et de la force de contact pour les essais en comportement 1. La Figure 5.13 illustre un exemple de ces évolutions en début d'essai pour l'échantillon 210331-01. Nous exposons ici un cas sans « bosse » de tension (essai 6) et un cas avec « bosses » (essai 7). Pour obtenir des courbes de forces exploitables, les signaux de force provenant du capteur piézométrique ont d'abord été filtrés numériquement pour éliminer la fréquence de résonance du capteur (de l'ordre de 20 kHz).

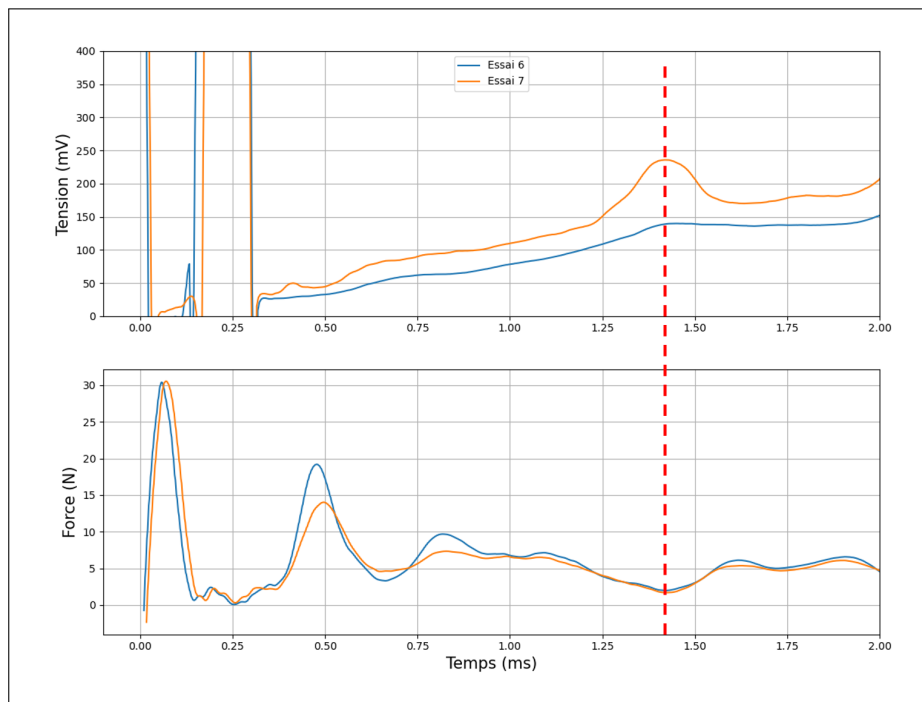


FIGURE 5.13 – Évolutions temporelles de la tension de contact et de la force de contact de l'échantillon 210331-01 au début d'essai entre 0 et 2 ms. Seuls les essais en comportement 1 sont étudiés car c'est sur eux que peuvent se produire les « bosses » de tension. Pour l'exemple, l'essai 6 présente le cas sans « bosse » et l'essai 7 celui avec « bosse ».

Nous pouvons ici voir que le moment d'apparition de la « bosse » de tension de contact sur l'essai 7, indiqué par la ligne en pointillés rouges, aux alentours de 1,40 ms coïncide bien avec une diminution de la force de contact. Cependant l'essai 6 montre que la même baisse de force de contact n'implique pas forcément une « bosse » de tension. La force de contact n'est donc pas le seul facteur conduisant à une « bosse » dans la tension. Il y a en effet une concomitance de plusieurs phénomènes antagonistes qui jouent sur la tension de contact :

- Lorsque la force de contact diminue, le rayon de contact se réduit selon la relation (1.4) ($a = \sqrt{\frac{F}{\xi \cdot \pi \cdot H}}$), ce qui augmente les pertes par effet Joule. La température et la tension de contact augmentent ;
- L'augmentation de la température des matériaux a pour conséquence de diminuer leur dureté, et donc d'augmenter le rayon de contact.

La force de contact et la dureté des matériaux sont ainsi en compétition pour réduire ou augmenter le rayon de contact. Lors des « bosses » de tension, c'est la diminution de la force de contact qui semble l'emporter puisque la tension de contact augmente. L'évolution de la dureté semble alors secondaire. Dans la prochaine sous-partie, nous détaillerons le modèle par analogie utilisé pour simuler ces essais en dynamique et nous verrons s'il conforte cette interprétation.

5.3 Simulation de l'essai dynamique grâce au modèle par analogie

Pour cette partie sur la simulation des échauffements du contact pendant les essais en dynamique, nous reprenons le modèle simplifié résolu sous Matlab[®] dont les hypothèses et les étapes du script ont été décrites dans le chapitre précédent.

Comme ce modèle est destiné au comportement du contact électrique fermé, la simulation de l'essai dynamique s'intéresse à la période où les électrodes sont en contact, c'est-à-dire après l'éventuel rebond avec l'arc.

La principale modification du modèle concerne la force de contact. En statique, elle était calculée à chaque pas en soustrayant la force de répulsion magnétique à la force de contact statique F_c . En dynamique, l'évolution de cette force est mesurée tout au long de l'essai grâce au capteur de force piézométrique. C'est ce signal que nous filtrons et que nous utilisons comme force de contact pour chaque pas de la simulation.

5.3.1 Définition des paramètres initiaux et modification du script

La définition des paramètres initiaux est légèrement différente pour la simulation en dynamique par rapport à la simulation en statique. Nous devons ici fixer :

- La durée totale simulée ainsi que le nombre de points de calcul ;

- La dureté du matériau le plus mou à température ambiante, pour pouvoir ensuite calculer à chaque pas de calcul la dureté du matériau en fonction de sa température grâce à la formule analytique de dureté relative (4.1). C'est cette dureté qui est utilisée pour calculer le rayon de contact à chaque pas pendant les essais en comportement 1. Cette valeur n'est pas utilisée pour la simulation des essais en comportement 2 car le rayon de contact est un paramètre fixe initialisé par l'utilisateur ;
- La température ambiante ;
- L'instant de départ de la simulation : temps à la fin du rebond, ou zéro s'il n'y a pas eu de rebond. Ce temps de départ sert à trouver les bonnes valeurs d'intensité de courant et de force dans les fichiers de points expérimentaux ;
- La température du contact et des cellules voisines au début de la simulation. Pour l'essai en dynamique, elle est égale à la température à la fin du rebond. Pour l'estimer, nous avons d'abord pris la valeur de tension de contact mesurée à la fin du rebond et nous avons utilisé la formule de Kohlrausch pour en déduire la température de l'interface. Vu nos résultats, nous avons vu que cette estimation était cohérente pour l'essai en comportement 1 simulé, mais était nettement sous-estimée pour la simulation de l'essai en comportement 2. Pour interpréter cette température plus élevée à la fin du rebond de l'essai en comportement 2, nous pouvons faire l'hypothèse que cela provient de la quantité de chaleur plus importante apportée par l'arc de rebond. En effet la contrainte thermique est d'environ $12300 \text{ A}^2.\text{ms}$ alors qu'elle n'est que d'environ $5800 \text{ A}^2.\text{ms}$ pour l'essai en comportement 1. Dans le cas où il n'y a pas de rebond durant l'essai dynamique, la température de départ de toutes les cellules est fixée à la température ambiante ;
- Le rayon de la surface de contact. C'est le principal paramètre de calage de la courbe UI calculée sur la courbe UI expérimentale pour les essais en comportement 2. Pour les essais en comportement 1, le rayon est calculé à partir de la force de contact et de la dureté de l'argent pour chaque pas. Il n'y a donc pas besoin de l'initialiser.

Dans le script permettant le calcul des échauffements du contact fermé, nous devons ici choisir, en plus du fichier de points du courant, le fichier de points correspondant à la force de contact filtrée. Ces valeurs de force mesurée seront utiles dans le script pour calculer à chaque pas le rayon de la surface de contact à partir de la formule $a(t) = \sqrt{\frac{F_{mesurée}}{\pi \cdot H_{Ag}(T(t))}}$ pour les essais en comportement 1. Dans cette formule, nous définirons la dureté de l'Ag par rapport à la température du contact en utilisant l'équation (4.1). En fonction de l'évolution de la force de contact, le rayon de contact pourra augmenter ou diminuer lors de la montée en courant, ce qui n'était pas le cas avec les essais en statique où il ne pouvait qu'augmenter.

Grâce à ce modèle, nous pouvons calculer pour une intensité de courant et une force de contact mesurées expérimentalement : l'évolution du rayon de contact, de la tension de contact, de la température moyenne de chaque cellule et l'évolution de la température à l'interface. L'ensemble de ces informations va nous permettre dans la partie suivante

d'expliquer au mieux les courbes expérimentales UI obtenues pour des comportements 1 et 2. Nous pourrions également vérifier si nous satisfaisons l'hypothèse de régime quasi-statique qui est une des conditions d'application de la formule de Kohlrausch.

5.3.2 Résultats

Nous allons maintenant présenter les résultats de la simulation pour deux essais qui sont les exemples typiques des deux types de comportement 1 et 2 que nous avons observés. L'exemple du comportement 1 est celui du 7ème essai sur l'échantillon 210331-01 pour une intensité I_2 . C'est l'échantillon dont nous avons déjà parlé dans ce chapitre et qui présente des « bosses » de tension sur certains de ses essais en comportement 1. L'exemple du comportement 2 est celui du 2ème essai sur l'échantillon 210326-01 pour une intensité I_2 .

Comparaison des caractéristiques UI expérimentales et issues de la simulation

Comportement 2 :

Pour ce calcul, nous avons réglé les paramètres initiaux de la manière suivante :

- 1000 points de calcul pour une durée simulée de 10 ms ;
- Temps du début du calcul : $t_{début} = 0.40 \text{ ms}$ (temps à la fin du rebond) ;
- Température ambiante : $T_{amb} = 20 \text{ °C}$;
- Températures à l'interface et des autres cellules : $T_m = 270 \text{ °C}$. La température théorique de Kohlrausch à partir de la tension mesurée est de 39 °C , mais les résultats de simulation avec cette valeur ne correspondent pas avec les résultats expérimentaux. La tension de la courbe UI calculée est trop basse par rapport à celle mesurée. Pour avoir une bonne correspondance, nous avons augmenté les températures initiales de l'interface et des autres cellules à 270 °C ;
- Rayon initial de la surface de contact : $a = 169 \text{ }\mu\text{m}$.

Nous avons également bloqué le rayon de contact au rayon indiqué dans les paramètres initiaux. En effet durant un essai en comportement 2, nous avons vu au chapitre précédent que le rayon de contact était constant. C'est ici aussi le cas grâce à la soudure provoquée par l'arc de rebond, même si la force de contact oscille à la suite du choc du CM sur le CF. Nous pouvons confirmer la présence d'une soudure après l'arc de rebond. En effet, les matériaux de contact fondent sous l'effet de l'arc, puis ils se refroidissent et se solidifient très rapidement puisque la tension de contact mesurée après le rebond est de l'ordre de la tension de contact des matériaux à température ambiante.

La Figure 5.14 présente une comparaison entre la caractéristique UI mesurée pendant l'essai et celle calculée avec le modèle par analogie et la Figure 5.15 illustre l'évolution temporelle de la température du contact pendant l'essai. Nous retrouvons sur ces figures les résultats déjà décrits dans le chapitre précédent sur l'étude en statique pour les essais

en comportement 2. Comme le rayon de contact est considéré comme constant pendant l'essai, l'échauffement du contact ne dépend pas d'une variation de la surface de contact. La caractéristique UI de l'essai en comportement 2 en dynamique est linéaire jusqu'à environ 1500 A. Cela correspond au début de la courbe de température de la Figure 5.15 jusqu'à $t=2$ ms, où nous pouvons voir que la température reste relativement stable. Nous retrouvons ici la zone réversible décrite dans les chapitres 2 et 4. Au-delà de 1500 A, la température augmente de façon plus franche, et la pente de la courbe UI augmente. Cela est dû à la résistivité des matériaux de contact qui augmente avec la température, comme cela a été expliqué dans les chapitres 2 et 4.

Une fois la valeur crête de l'intensité du courant atteinte, la phase de décroissance de l'onde de courant mène à un refroidissement du contact avec une baisse de la tension de contact. Nous retrouvons ici la même forme de cycle UI expérimental et calculée que celle décrite dans le chapitre précédent pour la phase ascendante du courant. Puis lors de la phase descendante du courant, le retard dans la baisse de tension est dû au temps nécessaire au matériau pour restituer la chaleur emmagasinée. Sur cet essai en comportement 2, les courbes expérimentale et calculée ont la particularité de se croiser. Nous avons observé ce phénomène lors de nos simulations lorsque la température du contact en début d'essai est significativement supérieure à la température ambiante, ce qui a tendance à rehausser la tension du contact lors de la montée du courant. Cependant sur ce graphique, le croisement se fait à environ 2100 A pour la courbe calculée, alors qu'il intervient plus tardivement pour la courbe mesurée, à environ 1400 A. La baisse plus rapide de la courbe calculée est due à la résistance de contact calculée qui décroît trop rapidement. Le rayon de contact étant constant, cette baisse de résistance est elle-même due à la température calculée du contact qui diminue trop rapidement. Il est difficile de trouver une origine unique à cet écart car la baisse de température est le résultat de plusieurs contributions antagonistes : la résistivité des matériaux de contact a tendance à augmenter la température via l'effet Joule, leurs capacités thermiques ralentissent la baisse de température, et leurs conduction thermiques favorisent l'évacuation de la chaleur, donc la baisse de la température de contact.

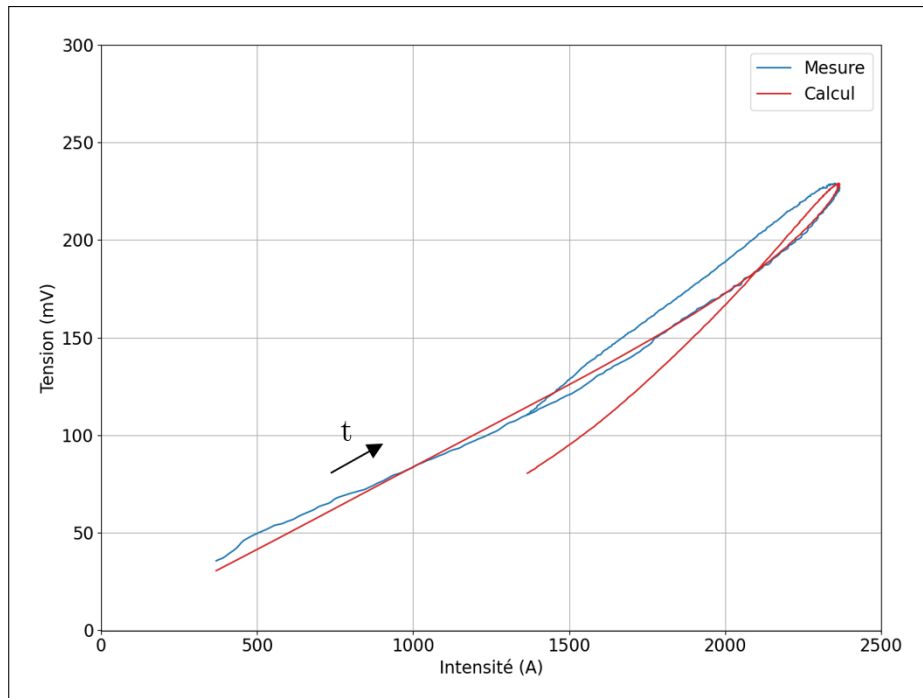


FIGURE 5.14 – Exemple de caractéristiques UI typiques durant un essai en comportement 2. Données expérimentales (en bleu) et résultats de calcul du modèle par analogie (en rouge) pour le 2ème essai réalisé sur l'échantillon 210326-01.

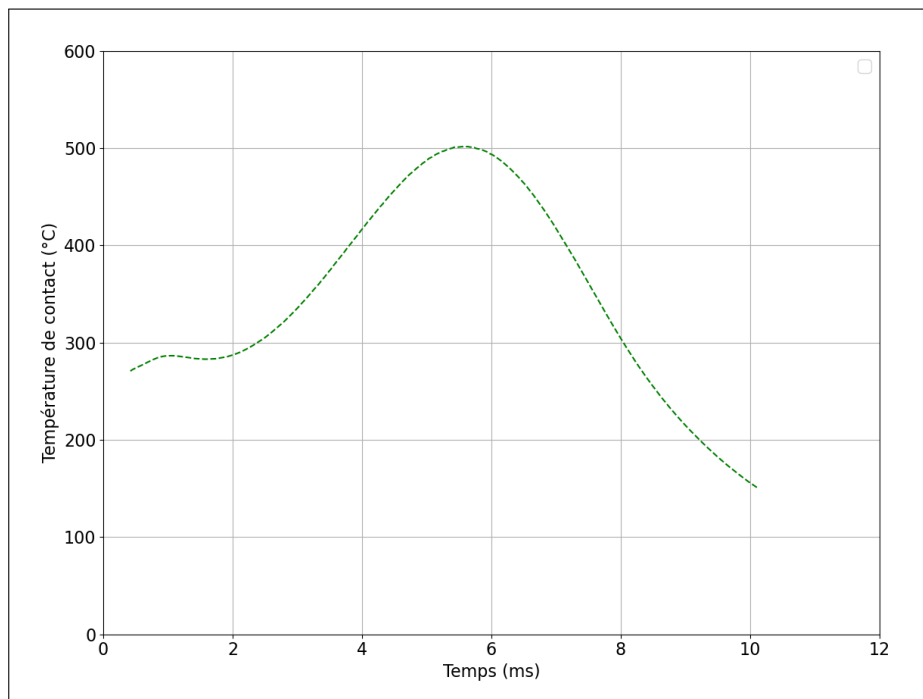


FIGURE 5.15 – Évolution temporelle de la température du contact pendant le 2ème essai réalisé sur l'échantillon 210326-01. Le rayon est ici constant et vaut $a=169 \mu\text{m}$.

Comportement 1 :

Pour le calcul de l'essai en comportement 1, les paramètres initiaux sont les suivants :

- 1400 points de calcul pour une durée simulée de 14 ms ;
- Dureté de l'Ag à température ambiante : $H=450$ MPa ;
- Temps du début du calcul : $t_{début} = 0,36$ ms (temps à la fin du rebond) ;
- Température ambiante : $T_{amb} = 20$ °C ;
- Température à l'interface : $T_m = 41$ °C. Pour cet essai en comportement 1, la température théorique de Kohlrausch mène à des résultats de simulation cohérents avec les mesures expérimentales. Par simplification, la température des cellules restantes est fixée à la température ambiante. Cela se justifie par la faible différence de température entre T_m et T_{amb} . De plus, même en fixant toutes les cellules à la température $T_m = 41$ °C, l'évacuation de cette faible quantité de chaleur par conduction ramène très rapidement les cellules à une température proche de la température ambiante, et cette différence n'est pas visible sur les caractéristiques UI .

Il est à noter que pour la simulation des essais en comportement 1 en dynamique, la dureté de l'Ag à température ambiante est fixée à 450 MPa contre 1000 MPa pour les essais en statique. Ces valeurs sont fixées comme paramètre de réglage pour faire coïncider la pente à l'origine de la courbe UI calculée avec celle de la courbe UI expérimentale. Cet écart de dureté est peut-être dû à la contrainte thermique de l'arc de rebond qui modifie les caractéristiques mécaniques de l'Ag en surface.

Dans ce script pour le calcul du comportement 1, le rayon de contact est calculé pour chaque pas en fonction de la dureté de l'argent et de la force de contact mesurée. Il peut donc varier librement tout au long de l'essai. Cependant ce n'est pas le cas en réalité pendant toute la durée de l'essai. En effet une fois la fusion atteinte, ce qui est le cas brièvement à environ 1600 A puis à partir de 2200 A si nous nous référons à la courbe expérimentale, le rayon de contact continue d'augmenter proportionnellement à l'intensité du courant, comme nous l'avons vu à la fin du chapitre précédent. Puis la baisse de l'intensité du courant va provoquer un refroidissement du contact qui se solidifie en conservant jusqu'à la fin de l'essai la surface de contact atteinte, indépendamment de la force de contact que nous mesurons. Comme le modèle par analogie n'est pas précis aux alentours de la tension de fusion, nous avons ajouté une contrainte sur le rayon de contact en le bloquant à partir de $t=6.5$ ms (1 ms après l'intensité crête du courant). Cela permet d'obtenir une fin de cycle qui coïncide avec la courbe expérimentale bien que le rayon calculé *in fine* soit légèrement plus petit que son maximum calculé à $t=5.5$ ms. Nous obtenons ainsi les caractéristiques UI présentées à la Figure 5.16 pour les valeurs simulées et les valeurs expérimentales. Les évolutions temporelles de la température et du rayon de contact sont illustrées à la Figure 5.17.

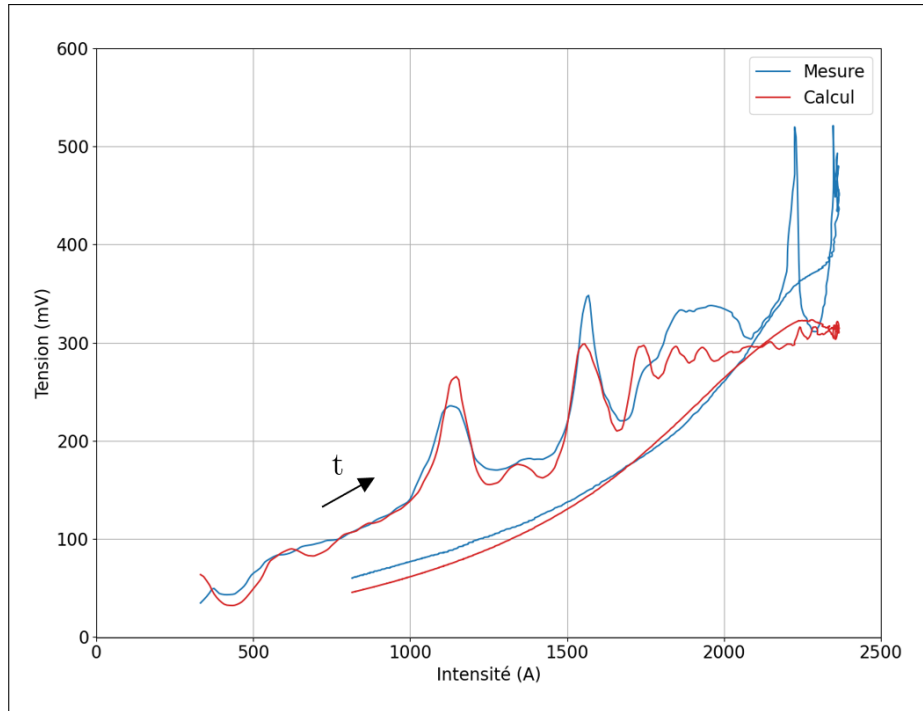


FIGURE 5.16 – Exemple de caractéristiques UI typiques durant un essai en comportement 1. Données expérimentales (en bleu) et résultats de calcul du modèle par analogie (en rouge) pour le 7ème essai réalisé sur l'échantillon 210331-01.

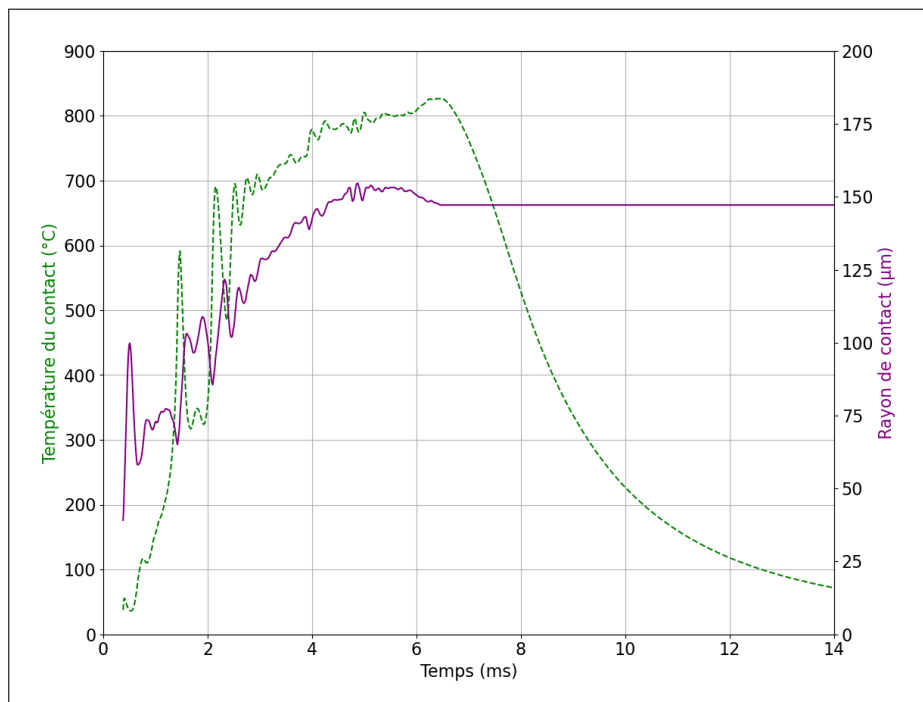


FIGURE 5.17 – Évolutions temporelles calculées de la température et du rayon de contact pendant le 7ème essai sur l'échantillon 210331-01.

Durant la phase ascendante du courant, avant l'entrée en fusion du contact, la caractéristique UI calculée suit bien l'évolution de la caractéristique UI mesurée, notamment les phénomènes de « bosses » dans la tension de contact. Le modèle par

analogie, qui a été conçu pour calculer au mieux les échauffements pour des températures allant jusqu'à la fusion, confirme les hypothèses émises dans l'interprétation des courbes avec « bosses » de tension dans la précédente sous-partie. C'est bien un ensemble de paramètres dépendants les uns des autres, dont la force de contact fait partie, qui sont à l'origine des « bosses » de tension. En effet la prise en compte de la force de contact mesurée pendant l'essai permet au modèle de prendre en compte les oscillations de cette force, avec des baisses de forces qui correspondent à des réductions du rayon de contact, elles-mêmes à l'origine des « bosses » de température (cf Figure 5.17), et donc des « bosses » de tension. De plus, le modèle ellipsoïdal de Holm, ainsi que les formules théoriques exposées au chapitre 1 ((1.4) pour le rayon de contact et (1.18) pour la force de répulsion) sont ici également validés puisqu'ils sont utilisés par le modèle pour faire coïncider les courbes calculée et expérimentale.

Le premier pic proche de la fusion des matériaux se produit aux alentours de 1600 A sur la courbe expérimentale de la Figure 5.16, ce qui correspond à un temps d'environ 2,5 ms sur la Figure 5.17. À partir de cette première entrée en fusion, nous observons sur le graphique de la Figure 5.16 que la tension de contact calculée ne suit plus aussi bien la tension de contact mesurée pendant l'essai. Cela est dû aux limites du modèle par analogie lors de l'entrée en fusion du contact. En effet le modèle ne prend pas en compte le changement de phase des matériaux et l'évolution du rayon de contact lors de la fusion et au moment des deux élongations du pont fondu qui sont nettement visibles sur la courbe expérimentale. Cela influe sur les données calculées pendant la fusion et dans la phase de descente de l'intensité du courant. À partir de 1600 A, la température calculée augmente plus doucement (Figure 5.17) et n'atteint pas la température de fusion des matériaux de contact (962°C pour l'argent et 1085°C pour le cuivre). Cela coïncide avec la tension de contact calculée plus faible que la tension mesurée.

Vérification de l'hypothèse de régime quasi-statique et application de la formule de Kohlrausch

Pour vérifier si le régime des essais en dynamique est bien quasi-statique et si l'application de la formule de Kohlrausch est possible, nous reprenons les résultats des simulations précédentes pour le comportement 2 et le comportement 1. Cette fois, nous utilisons les données de température de l'interface et les données de tension de contact pour tracer pour chaque comportement deux graphiques :

- Le premier compare les évolutions temporelles de la tension de contact et de la température de contact simulées avec le modèle. Nous pouvons ainsi observer s'il y a un décalage temporel entre les deux courbes, c'est-à-dire si les variations de température sont en retard sur les variations de tension de contact ;
- Le deuxième compare la température de contact simulée et la température de contact théorique déduite de l'application de la formule de Kohlrausch à partir de la tension calculée. Nous pouvons ainsi voir à quels moments de nos essais la formule de Kohlrausch est applicable.

Comportement 2 :

La Figure 5.18 représente les évolutions temporelles de la tension et de la température de contact lors du même essai menant au cycle UI de la Figure 5.14. Nous nous intéressons ici à la partie ascendante de la courbe de tension jusqu'à environ 6,5 ms puisque pour cette partie, les résultats de simulation correspondent aux résultats expérimentaux sur le cycle UI . Lors de cet essai, le maximum de la tension de contact est atteint à l'instant $t_U=5,2$ ms alors que le maximum de la température de contact intervient à $t_T=5,5$ ms. Cela souligne la présence d'un décalage temporel entre la tension et la température.

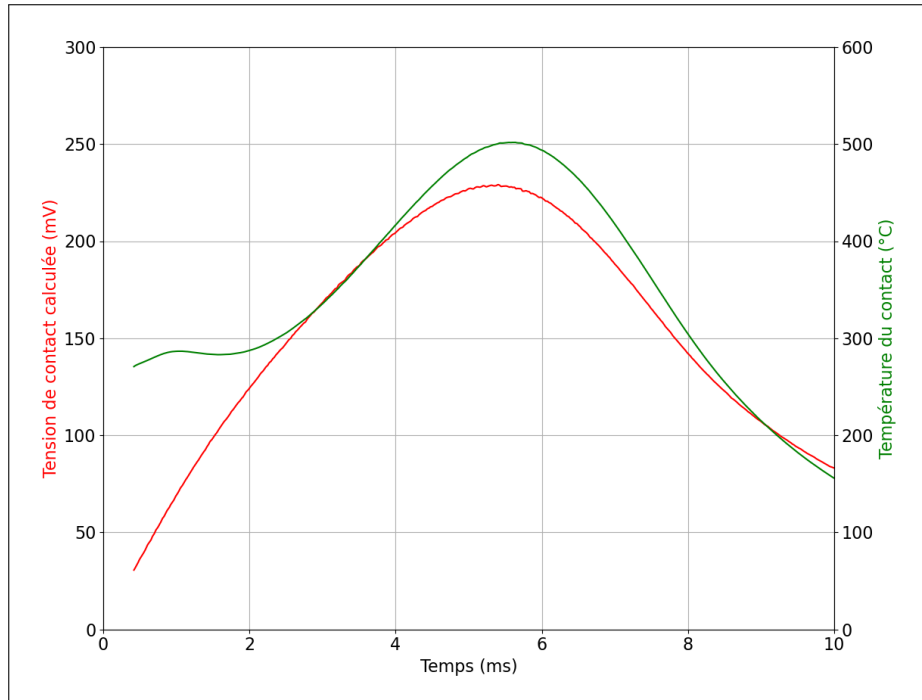


FIGURE 5.18 – Évolutions temporelles de la tension de contact et de la température de contact calculées par le modèle lors de l'essai en comportement 2.

Pour vérifier si la tension et la température calculées satisfont la formule de Kohlrausch, nous avons également tracé sur la Figure 5.19 la température simulée et la température théorique obtenue par l'application de la formule de Kohlrausch à la tension calculée. Sur cette figure, l'erreur relative de la température théorique via Kohlrausch par rapport à la température calculée est inférieure à 10 % entre 3 et 6,5 ms. Pour rappel la fin des courbes à partir de 6,5 ms n'est pas interprétée car le cycle UI calculé ne coïncide pas avec le cycle mesuré. Dans nos conditions expérimentales, nous pouvons donc appliquer la formule de Kohlrausch sur cette plage de temps avec une erreur qui reste raisonnable. C'est intéressant car la mesure de la tension de contact pendant l'essai nous permet de calculer la température maximale à laquelle le contact testé a chauffé.

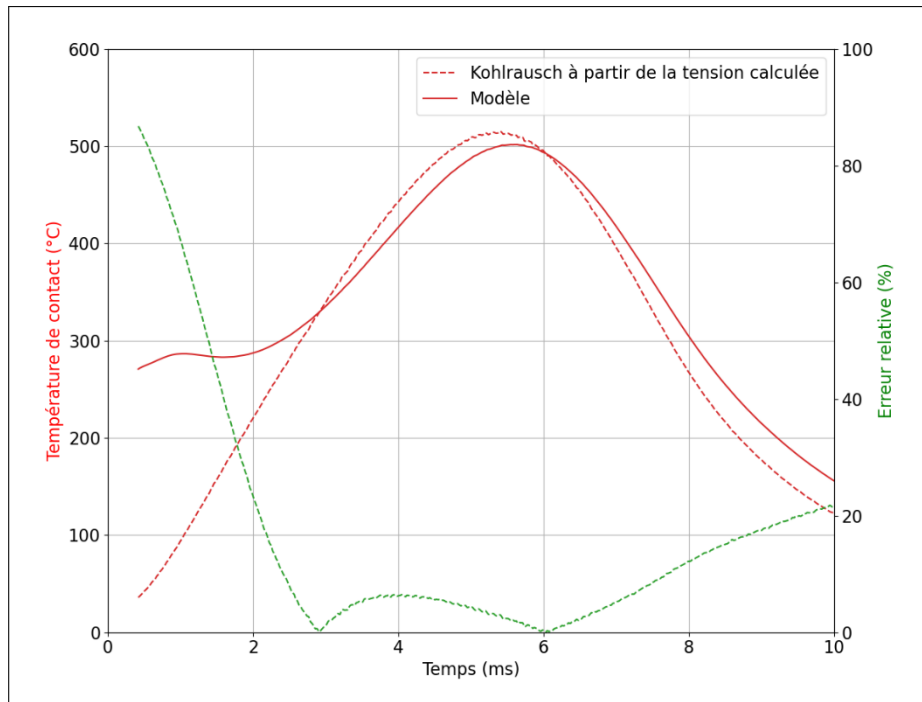


FIGURE 5.19 – Comparaison entre la température de contact calculée par le modèle et la température théorique déduite de l'application de la formule de Kohlrausch en fonction du temps lors de l'essai en comportement 2.

Comportement 1 :

Sur les cycles *UI* de la Figure 5.16, nous voyons que la tension calculée avec le modèle suit correctement la tension mesurée pendant l'essai, jusqu'à une intensité d'environ 1600 A où la tension calculée atteint 300 mV, puis oscille et stagne en dessous de 300 mV alors que la tension mesurée grimpe pour dépasser la tension de fusion des matériaux vers 2200 A. Sur la Figure 5.20, nous voyons que le premier pic de tension à 300 mV est atteint à environ 2,2 ms, ce qui correspond à une température calculée d'environ 700 °C. Les graphiques de la Figure 5.20 et de la Figure 5.21 seront donc analysés et interprétés du début de l'essai jusqu'à cette limite.

Prenons maintenant le même type de courbes que celles présentées pour les essais en comportement 2, mais cette fois pour les essais en comportement 1. Sur la Figure 5.20, nous voyons à nouveau un décalage temporel avec la température du contact qui est légèrement en retard sur la tension de contact. Ce décalage est visible surtout lors des deux premiers pics, à environ 1,5 et 2,2 ms.

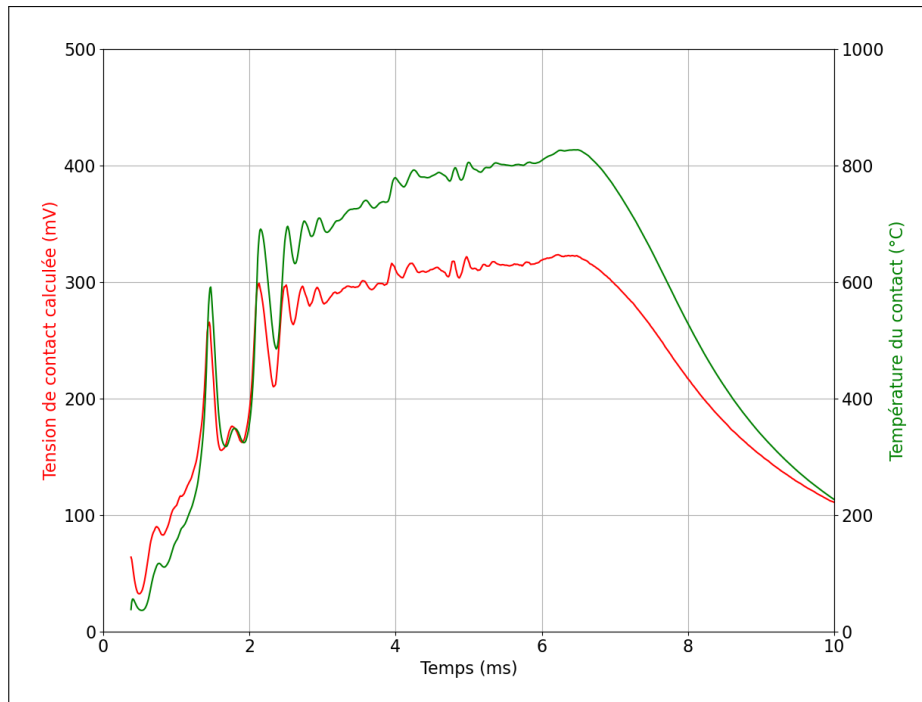


FIGURE 5.20 – Évolutions temporelles de la tension de contact et de la température de contact calculées par le modèle lors de l'essai en comportement 1.

Pour vérifier à quels moments de l'essai les couples (tension calculée, température calculée) satisfont la formule de Kohlrausch, nous traçons à la Figure 5.21 les évolutions temporelles de la température simulée et la température théorique via Kohlrausch. Si nous nous concentrons sur les valeurs de température du début de l'essai jusqu'à une température de 700 °C, vers 2,2 ms, nous voyons que l'erreur relative est dans l'ensemble élevée, mais qu'elle est proche de zéro pour tous les maxima et les minima locaux des deux températures présentées. Nous pouvons donc en déduire que dans nos conditions expérimentales, nous pouvons appliquer la formule de Kohlrausch à ces moments-là avec une erreur relative très faible.

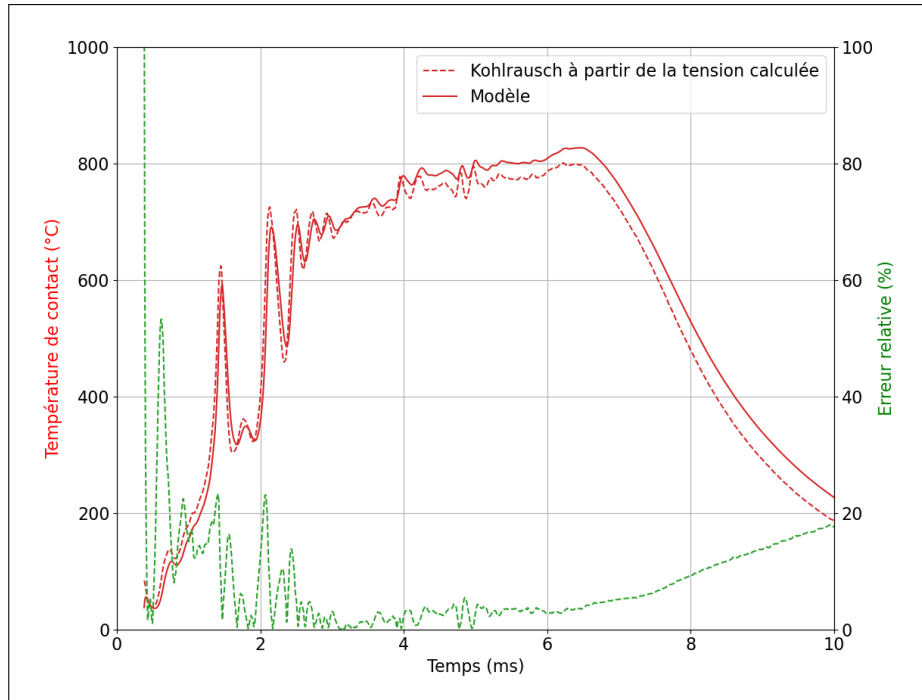


FIGURE 5.21 – Comparaison entre la température de contact calculée par le modèle et la température théorique déduite de l'application de la formule de Kohlrausch en fonction du temps lors de l'essai en comportement 1.

Pour conclure cette partie sur la simulation de l'essai dynamique, nous pouvons faire un état des lieux sur les apports de ce modèle par analogie. Malgré la géométrie simplifiée et les hypothèses fortes de modèle ellipsoïdal et d'analogie thermoélectrique, ce modèle descriptif permet :

- De compléter les mesures expérimentales en déterminant par le calcul l'évolution temporelle de la température et du rayon de contact ;
- D'appuyer les interprétations sur la forme des caractéristiques UI qui sont données dans la littérature. Il montre en effet la relation entre l'ensemble des grandeurs électriques (tension, courant), mécaniques (force et rayon de contact) et thermique (température du contact) ;
- De connaître les instants de nos essais où la tension et la température de contact satisfont la formule de Kohlrausch, c'est-à-dire les instants où les grandeurs électriques et thermiques sont en régime « quasi-statique ».

5.4 Force de collage

5.4.1 Types de collage rencontrés dans ces essais

Lors de ces essais sur le gabarit « contact électrique dynamique », nous avons observé plusieurs types de courbes UI qui présentent des caractéristiques pouvant mener à un collage statique et/ou dynamique.

Le collage dynamique que nous avons pour objectif d'étudier avec ce gabarit est provoqué par l'échauffement des matériaux de contact par l'arc durant le rebond à la fermeture. Tous les essais ayant un rebond sont donc sujets à ce collage dynamique. Le collage statique quant à lui se produit lorsque la température de surface des électrodes maintenues fermées dépasse la température de fusion des matériaux. C'est le cas ici pour les essais au comportement 1 qui atteignent le palier de fusion.

Pour l'interprétation de la suite des données de force de collage, il est important de discriminer le type de collage en fonction du comportement 1 ou 2 des cycles UI :

- Les cycles UI de comportement 2 sont tous intervenus après la présence d'un rebond. Leur surface de contact élevée après l'arc de rebond évite des échauffements trop importants pouvant mener le contact à sa température de fusion. Les essais de comportement 2 sont donc uniquement sujet au collage dynamique ;
- Les cycles UI de comportement 1 sont plus complexes à analyser. Il peut y avoir du collage dynamique s'il y a présence d'un rebond. De plus pour les intensités I_2 et I_3 , du fait de l'onde de courant injectée dans le contact, la température de fusion est également atteinte pour le contact fermé avant le pic de courant, ce qui induit un collage statique. En réalité dans le produit de protection, la détection du courant de court-circuit et le déclenchement de l'ouverture des électrodes se fait en un temps très court d'environ 1 ms. L'intensité du courant est donc limitée et n'atteint pas des valeurs menant au collage statique comme sur cet équipement.

C'est cette distinction qui a été faite sur les points expérimentaux de la force de collage mesurée. Ces points sont présentés à la Figure 5.22. Les marqueurs en forme de losange représentent les essais en comportement 1, qui sont donc soit une force de collage statique pure s'il n'y a pas eu de rebond, soit un mélange de force de collage statique et dynamique si le contact a rebondi. Les marqueurs en forme de croix se réfèrent aux essais en comportement 2, qui sont eux uniquement le résultat d'une force de collage dynamique. Pour l'étude de la force de collage purement dynamique, liée à l'arc lors du rebond à la fermeture, il faudra donc se concentrer sur les essais de comportement 2.

5.4.2 Influence de la contrainte thermique de l'arc de rebond sur la force de collage

Pour étudier dans quelle mesure la contrainte thermique de l'arc a un impact sur la force de collage, nous avons tracé la Figure 5.22. Elle représente les forces de collage mesurées à la fin de l'essai électrique, lorsque le contact est revenu à température ambiante, en fonction de la contrainte thermique imposée aux électrodes de contact. La contrainte thermique calculée et affichée sur le graphique est en fait la somme de celle du claquage et de celle de l'arc. Cependant la contrainte thermique du claquage est très faible, de l'ordre de la dizaine d'A².ms pour I_1 et I_2 et de la centaine d'A².ms pour I_3 . Elle est donc négligeable devant les contraintes thermiques imposées par les arcs de rebond. Dans la suite de cette section, nous parlerons donc de l'impact de la contrainte thermique liée à l'arc de rebond, en négligeant l'impact du claquage.

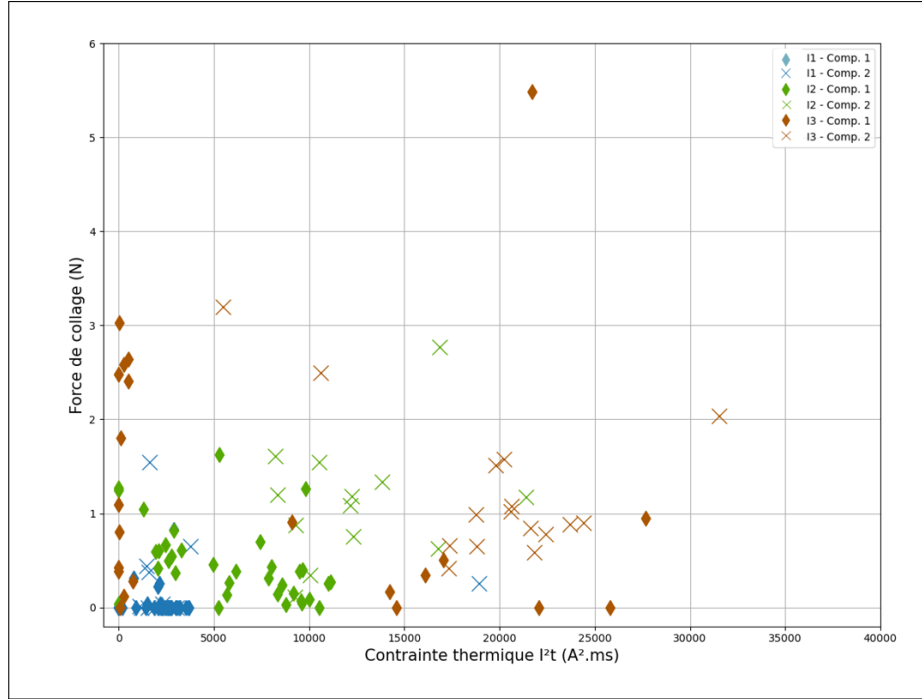


FIGURE 5.22 – Forces de collages mesurées à la fin de l’essai électrique en fonction de la contrainte thermique imposée par l’arc lors du rebond à la fermeture. Les marqueurs en forme de losange se réfèrent à une caractéristique UI de comportement 1 et ceux en forme de croix à une caractéristique UI de comportement 2. Une contrainte thermique proche de zéro signifie qu’il n’y a pas eu de rebond lors de cette essai.

La première observation que nous pouvons faire sur cette Figure 5.22 est que les forces de collage sont globalement comprises dans une fourchette de 0 à 3 N. Ces valeurs mesurées sont relativement faibles, ce qui est rassurant puisque l’ AgC est justement utilisé dans ce contact pour sa soudure fragile.

Force de collage à la fin d’un essai en comportement 2

Si nous nous concentrons maintenant sur tous les essais ayant un comportement 2 (marqueurs en forme de croix), c’est-à-dire les essais avec un collage purement dynamique, nous pouvons observer que les forces de collage ont tendance à augmenter au fur et à mesure de l’augmentation de la contrainte thermique de l’arc, même si elles restent faibles dans l’ensemble. Cela coïncide avec les résultats présentés au chapitre 2 dans l’état de l’art du collage dynamique : la force de collage augmente bien en fonction de l’énergie de l’arc ou en fonction de la charge électrique ou de la contrainte thermique qui sont toutes les deux des images de l’énergie de l’arc de rebond, et cela pour plusieurs matériaux comme l’ Ag , l’ AgC et le Cu .

Cherchons ensuite à comparer les valeurs de forces de collage dynamique mesurées avec les valeurs théoriques maximales définies par la formule (2.13) et visibles dans la Figure 2.14. Pour comparer ces valeurs, il faut d’abord estimer nos valeurs d’énergie d’arc (en J) telles qu’elles sont présentées dans [50]. Pour obtenir ces valeurs d’énergie, nous utilisons une valeur approchée de la tension de l’arc (12 V) qui est celle mesurée en moyenne lors de nos essais avec la sonde de tension différentielle en calibre x100. Une fois les

énergies maximales d'arc obtenues pour chacune des trois intensités d'arc, nous pouvons les utiliser dans la formule (2.13) pour définir les forces de collage maximales théoriques, et les comparer avec nos valeurs expérimentales de forces de collage. Le Tableau 5.3 présente les résultats de ces calculs.

	$I^2t(A^2.s)$	$W_{arc}(J)$	$(F_{collage\ max})_{théo.}\ (N)$	$(F_{collage})_{exp.}\ (N)$
I_1	18,9	1,07	6,43	$\leq 1,54$
I_2	21,4	0,78	5,44	$\leq 2,77$
I_3	31,5	1,12	6,58	≤ 3.20

TABLE 5.3 – Tableau présentant les valeurs maximales expérimentales de la contrainte thermique, de l'énergie d'arc qui en découle, et des valeurs théoriques de forces de collage obtenues avec la formule (2.13) qui utilise les énergies d'arc expérimentales. La dernière colonne présente les valeurs maximales de forces de collage mesurées.

Nous trouvons expérimentalement des valeurs de force de collage plus faibles que les valeurs théoriques maximales. Ce résultat est parfaitement cohérent avec les résultats cités dans l'état de l'art sur le collage dynamique au chapitre 2. Ces valeurs sont toutefois bien plus faibles que les valeurs théoriques maximales. Cet écart peut être dû à la dégradation des surfaces de contact au fur et à mesure des essais électriques sur les contacts et/ou à la valeur de tension approchée d'arc de rebond (12 V) que nous avons choisi.

Force de collage à la fin d'un essai en comportement 1

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, il peut y avoir deux types de collage pour les essais en comportement 1. Sur le graphique de la Figure 5.22, les essais ayant une contrainte thermique significative correspondent à des essais avec présence d'un rebond. L'interprétation de leur valeurs de force de collage mesurées est délicate car la force de collage a pour origine un mélange entre collage statique et dynamique, et nous ne pouvons pas avec nos résultats discerner la contribution de chacun de ces collages.

Certains essais en comportement 1 ont la particularité d'avoir une contrainte thermique proche de zéro. Ils représentent les essais sans rebond, avec une contrainte thermique mesurée qui est uniquement due au claquage électrique. Pour ces essais, c'est donc le collage statique qui prédomine et qui est à l'origine de la force de collage mesurée. Nous avons remarqué que pour deux des trois échantillons ayant de tels essais en comportement 1 sans rebond, plus le palier de fusion est large, plus la force de collage statique est importante. Cela coïncide avec le rapport I_f/a_f constant vu au précédent chapitre : une fois la fusion atteinte, plus l'intensité du courant augmente, plus le rayon de contact fondu sera grand, et donc plus la force de collage sera importante si nous nous référons à la relation (1.20). Les courbes sur le troisième échantillon n'ont pas pu être exploitées car les zones des paliers de fusion sont trop bruitées pour que l'on puisse clairement les identifier.

5.5 Aperçu de l'influence des matériaux de contact dans les phénomènes de collage

Dans cette dernière partie sur les résultats expérimentaux de notre étude sur le collage dynamique, nous allons résumer les observations faites en matière de matériaux de contact présents dans l'arc. Pour rappel, les électrodes utilisées sont pour le CF l'*AgC* et pour le CM du cuivre revêtu d'une couche de 5 μm d'*Ag*. Nous avons vu dans l'état de l'art sur le collage dynamique au chapitre 2 que pour une même énergie d'arc, le *Cu* avait une force de collage supérieure à celle de l'*Ag* (Figure 2.11 et Figure 2.13). Nous voulons donc ici déterminer quel matériau du CM est présent dans l'arc de rebond, c'est-à-dire savoir si l'arc se nourrit uniquement du revêtement en *Ag*, ou bien s'il attaque également le *Cu* présent en-dessous de cette couche d'*Ag*. Le second objectif est de voir l'influence que cela a sur la force de collage.

Pour cela, nous avons effectué à chaque test une mesure spectrométrique de l'arc pour essayer de détecter la présence des raies d'*Ag*, de *C* et de *Cu* sur les spectres enregistrés ainsi qu'une visualisation de l'arc de rebond par imagerie rapide munie de filtres interférentiels pour détecter la présence d'*Ag* et de *C* dans l'arc. À la fin de la campagne de tests électriques, nous avons complété les mesures spectroscopiques en analysant d'un point de vue matériaux les surfaces des CF comme nous l'avons fait pour l'étude du collage statique. Cette analyse nous a permis d'observer les surfaces à la fin des 10 essais électriques, et donc de voir si le *Cu* du CM avait été attaqué au cours de ces 10 essais.

5.5.1 Résultats de l'imagerie rapide et de la spectroscopie

Imagerie rapide avec filtres interférentiels

Nous avons réalisé lors de chaque essai une vidéo des contacts par imagerie rapide à 40 000 images/sec. Le dédoubleur d'image utilisé nous a permis de visualiser deux fois la même image en parallèle en pouvant filtrer sur chacun des deux objectifs la lumière émise par l'arc dans une plage de longueur d'onde spécifique. La première plage est celle centrée sur la raie de l'argent à $543,5 \pm 10$ nm, et la deuxième est celle centrée sur le carbone à 600 ± 10 nm.

Pour tous les essais avec rebond, nous avons vu l'arc sur chacune des deux images filtrées. Nous ne pouvons cependant pas conclure directement sur la présence d'*Ag* et de *C* dans l'arc de rebond. Nous avons besoin de visualiser les résultats de spectroscopie pour compléter l'analyse. En effet, la lumière de l'arc visible à travers chacun des filtres peut être la somme de deux composantes que nous pouvons distinguer sur les spectres énergétiques :

- Le fond continu qui est la conséquence du rayonnement de freinage des électrons par des particules lourdes et de la recombinaison radiative dans un arc avec une densité électronique suffisamment élevée. Sur nos spectres, son intensité est relativement constante sur toute la gamme de longueurs d'ondes testées ;

- Le signal provenant des transitions électroniques de l'élément recherché. Avec le filtre, seules quelques transitions radiatives, caractéristiques d'un élément, peuvent être visualisées. En spectroscopie, ce signal correspond à une raie à la longueur d'onde correspondant à l'énergie de désexcitation d'un atome ou d'un ion.

Dans la section suivante, nous verrons que les résultats spectroscopiques confirment bien la présence d'*Ag* avec la visualisation de ses raies caractéristiques. Nous ne verrons cependant pas de raie aux alentours des 600 nm, ce qui implique que la lumière visible à la caméra rapide avec le filtre à 600 nm provient du fond continu de l'arc de rebond. Nous ne pouvons donc pas conclure sur la présence de *C* dans l'arc de rebond.

L'utilisation du dédoubleur a cependant l'inconvénient de réduire la résolution de l'image du contact. Elle est divisée par deux à cause des deux voies optiques du dédoubleur, et le fait de placer le dédoubleur sur l'axe optique nous oblige à éloigner la caméra, ce qui réduit également la résolution de l'image du contact. Ce manque de résolution nous a empêché de réaliser une analyse plus quantitative du phénomène d'arc, avec par exemple une comparaison de la taille des pieds d'arcs en fonction de l'intensité lumineuse de l'arc d'un essai à l'autre.

Spectrométrie

Nous avons complété ce diagnostic d'imagerie rapide par des mesures spectroscopiques pour détecter la présence d'*Ag*, de *C* et de *Cu* dans l'arc de rebond.

Avant de réaliser les mesures de la campagne de tests, nous avons réalisé des essais entre deux électrodes en cuivre pour visualiser un spectre ayant les raies de longueur d'onde caractéristique de ce matériau. La Figure 5.23 illustre un exemple de spectre de cuivre acquis lors de ces essais préliminaires. La raie de cuivre est visible à la longueur d'onde de 515 nm [69] représentée par un trait vertical pointillé rouge sur le spectre. C'est cette raie ou d'autres raies comme les raies de résonance à 324.7 nm et 327.4 nm que nous chercherons à retrouver sur les spectres obtenus pendant la campagne de test.

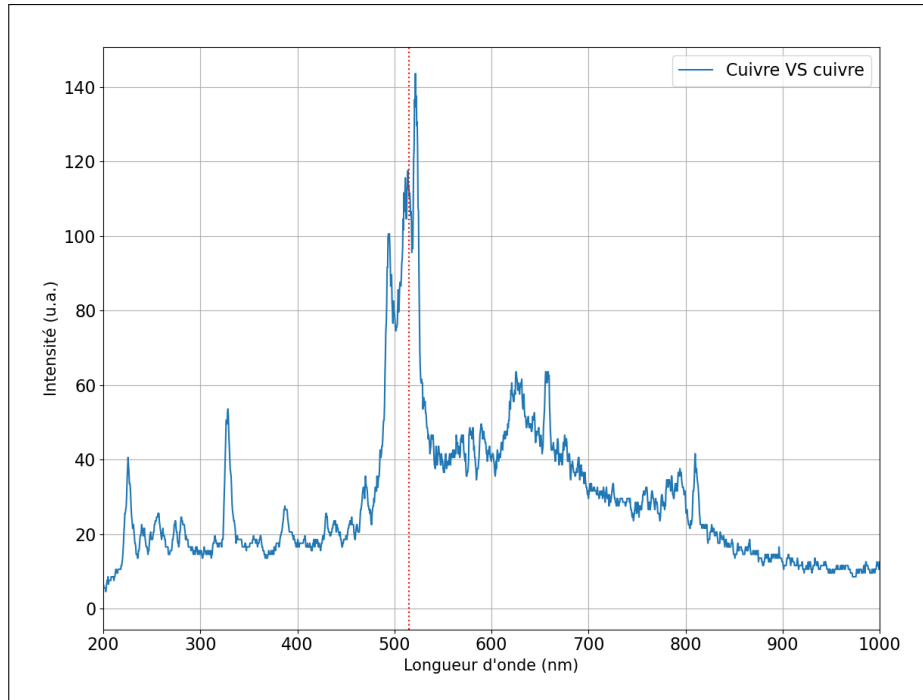


FIGURE 5.23 – Spectre de l’arc de rebond entre deux électrodes en cuivre pour une intensité de courant I_2 . La raie caractéristique du cuivre à 515 nm est mise en évidence par le trait vertical pointillé rouge.

La Figure 5.24 présente maintenant les 10 spectres obtenus lors d’essais sur la paire d’électrodes 210326-01 du disjoncteur modulaire pour une intensité de courant I_2 . Ces spectres sont un exemple caractéristique de ce que nous avons observé sur l’ensemble des échantillons et des intensités de courant. Les spectres obtenus pour les autres échantillons sont similaires à ceux-là et mènent aux mêmes conclusions. Le niveau d’intensité d’un essai à l’autre est variable sur le graphique. Il dépend de l’intensité lumineuse émise par l’arc de rebond durant l’essai et de la position de la fibre optique par rapport au contact (orientation, distance). Cette variation n’empêche cependant pas de trouver les raies spécifiques aux espèces en présence dans l’arc de rebond.

Cette fois sur les spectres de la Figure 5.24, nous distinguons clairement les raies caractéristiques de l’argent pour les longueurs d’ondes de 328, 338, 521 et 547 nm [69] mais nous ne visualisons plus la raie caractéristique du cuivre à 515 nm (trait pointillé rouge), ni ses deux raies de résonance. La raie caractéristique du carbone à 344 nm [69] est difficile à repérer car elle est très proche de la raie d’argent plus intense à 338 nm, et sa raie caractéristique à 601 nm n’est pas visible non plus.

Le fait de ne pas distinguer la raie caractéristique du cuivre sur les spectres ne signifie pas forcément une absence de cuivre dans l’arc lors du rebond à la fermeture. S’il y a présence de cuivre dans l’arc sans distinction sur les spectres, cela peut provenir d’une proportion trop faible de cuivre par rapport aux autres espèces de l’arc, la raie du cuivre peut donc être « noyée », par exemple dans celle de l’argent qui est très intense dans nos essais. Cela peut également provenir de l’angle de visée de la fibre optique du spectromètre : si la fibre est située trop haute par rapport au contact, le cuivre provenant

du contact mobile pourrait être caché par le volume du contact mobile lui-même. Enfin, cela peut provenir d'un chevauchement des raies de cuivre et d'argent dû à une mauvaise résolution spectrale.

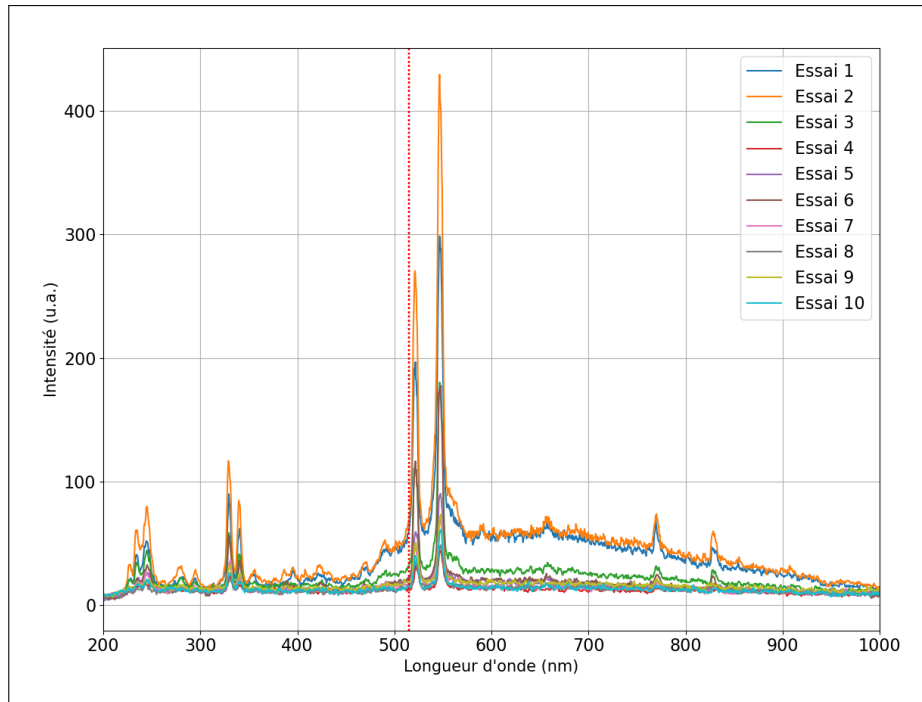


FIGURE 5.24 – Exemple des spectres des 10 essais réalisés sur l'échantillon 210326-01 à l'intensité de courant I_2 . La ligne pointillée rouge est fixée à 515 nm et correspond à une longueur d'onde spécifique du cuivre (non visualisable sur ces spectres).

5.5.2 Analyse matériaux de la surface des échantillons

Étant donné le fait que nous n'avons pas pu distinguer la présence de cuivre dans l'arc pour chaque essai grâce à la spectroscopie, nous avons décidé de mener des analyses matériaux de la surface des échantillons comme nous l'avions fait pour l'étude sur le collage statique. Le but est de trouver une preuve de la présence du cuivre dans l'arc, notamment grâce à une analyse de composition chimique de surface à l'EDX. Pour cette partie, seuls les contacts fixes ont été analysés car ils ont l'avantage d'être plats contrairement aux contacts mobiles dont la courbure rend difficile les analyses en 3D. Nous rappelons que les pastilles des contacts fixes sont en AgC .

La difficulté de cette analyse matériaux est le nombre important de tests ayant été réalisés sur la même électrode. Il y a eu en tout 10 tests, la plupart du temps avec un arc de rebond, et qui n'a pas toujours eu lieu au même endroit d'un test à l'autre. Nous avons tout de même cherché à mesurer le rayon de contact fondu sur les échantillons d' AgC et nous avons également cherché des preuves de fusion du cuivre avec l'argent pour confirmer la présence de cuivre dans l'arc de rebond, cuivre provenant du contact mobile qui est en cuivre revêtu d'argent.

La mesure du rayon fondu en fonction de l'intensité de l'arc est délicate du fait des 10 tests réalisés sur le même échantillon. Nous avons en effet mesuré des rayons

fondus « solitaires » sur certains échantillons où les traces de fusion étaient décalées les unes des autres. Cependant nous n'avons pas de moyens de savoir à quel numéro de test correspond cette trace, et donc quel a été le comportement de ce test. Si c'était un comportement 2, le rayon fondu correspondrait bien au rayon fondu par l'arc de rebond. Mais si c'était un comportement 1, le rayon fondu serait la conséquence d'un éventuel arc s'il y en avait un pendant cet essai et de la fusion lors des paliers que nous voyons à forte intensité sur les graphiques de ce chapitre. Nous ne pouvons donc rien conclure des valeurs de rayon fondu mesurées.

Pour les preuves de fusion, nous avons d'abord observé sur tous les échantillons des bourrelets sur le bord des surfaces de contact avec des gouttelettes fondues qui ont été éjectées de la zone de contact vers l'extérieur, comme l'illustre la Figure 5.25 où nous voyons distinctement la zone creusée par les arcs en bleu et sur les bords les gouttelettes éjectées en orange et rouge. Indépendamment de quel matériau a fondu, nous pouvons tout d'abord confirmer que les électrodes ont subi au moins une fusion lors des 10 tests consécutifs, ce à quoi nous nous attendions.

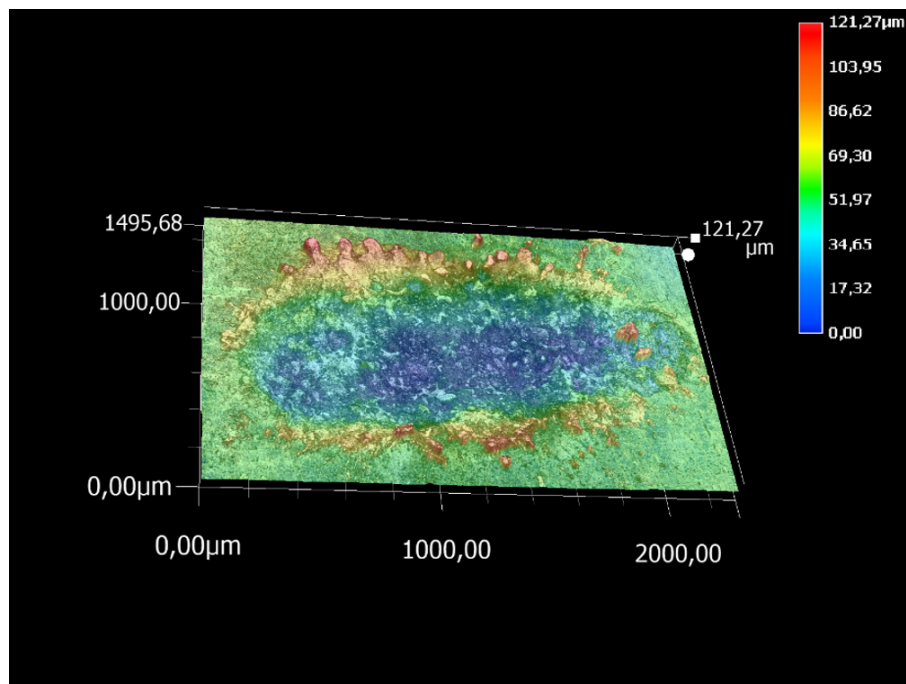


FIGURE 5.25 – Image 3D du CF de l'échantillon 210330-03 observé au microscope optique (assemblage d'images en grandissement x500) avec une échelle de couleurs correspondant à la hauteur du pixel de l'image.

Afin de vérifier si du cuivre du CM a bien été allié avec l'argent du CF, nous avons observé deux CF de chaque intensité de l'arc de rebond au MEB avec une analyse EDX des éléments chimiques présents en surface. Nous avons détecté pour les trois intensités d'arc la présence d'un alliage $AgCu$ qui prouve la fusion du cuivre du CM lors des essais et son transfert vers l'autre électrode, avec un pourcentage de cuivre significativement plus élevé pour les essais à I_3 , de l'ordre de 4 fois plus que les valeurs relevées pour les essais à I_1 et à I_2 . Néanmoins cet alliage prouve certes la fusion du cuivre, mais ici encore

on ne sait pas si cela correspond à une fusion lors d'un essai en comportement 1 ou lors d'un essai en comportement 2, donc nous ne savons pas si la fusion a eu lieu pendant l'arc de rebond (cuivre présent dans l'arc également) ou si la fusion a été atteinte lors du plateau visible sur les cycles UI à fort courant. De plus cette observation en fin des 10 tests ne nous permet pas non plus d'affirmer que chacun des essais a mené à une fusion du cuivre.

De l'analyse matériaux de la surface des échantillons, nous pouvons donc affirmer que le revêtement en Ag du CM a été détruit et que le Cu du même CM a été attaqué, soit lors de l'arc de rebond soit lors du plateau de fusion à fort courant, pour au moins un des 10 tests réalisés sur l'échantillon analysé. Nous déduisons également de ces analyses que la part de Cu impliquée dans l'arc ou la fusion à fort courant est plus importante pour les essais au courant le plus élevé (I_3), ce qui concorde avec l'hypothèse faite pour expliquer les tensions de fusion plus élevées observées sur les cycles UI pour l'intensité I_3 . En ce qui concerne la pastille en AgC du CF, nous ne pouvons qu'observer sa forte érosion sur les images en microscopies optique et électronique.

5.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre du manuscrit de thèse, il a été question de collage dynamique. Pour étudier ce phénomène, nous avons utilisé le gabarit « contact électrique dynamique ».

Après avoir détaillé dans une première partie le protocole de test avec les intensités d'arc et le nombre de tests et d'échantillons, nous avons décrit dans la deuxième partie les caractéristiques UI obtenus lors des essais en dynamique. Nous avons ainsi détaillé les étapes de ces cycles UI et leur caractéristiques :

- Lors du rapprochement des électrodes et avant le premier contact, un claquage se produit lors de la quasi-totalité des essais. L'énergie thermique qu'il impose aux matériaux de contact est négligeable par rapport à celle causée par l'arc lors du rebond ;
- Les électrodes subissant un rebond entrent en contact une première fois pendant 0.158 ± 0.058 ms puis rebondissent pendant 0.166 ± 0.062 ms. C'est pendant ce rebond à la fermeture que se produit l'arc ;
- La suite des cycles UI se fait soit en comportement 1 soit en comportement 2. Nous avons vu qu'il pouvait y avoir de fortes oscillations de tension autour de la tension de fusion pour les deux intensités les plus élevées I_2 et I_3 , sûrement due à la fragilisation de la surface réelle de contact à cause de l'arc de rebond et des essais successifs sur le même échantillon. Le moindre mouvement des supports de contact, ou le mouvement relatif entre les supports et les électrodes peut en effet faire s'allonger le pont fondu. Nous avons ensuite comparé les tensions de fusion moyennes

des trois intensités par rapport à celles observées en statique. Elles correspondent pour I_1 et I_2 mais sont plus élevées en dynamique qu'en statique pour I_3 . Cela peut être dû à une proportion plus importante de cuivre dans le bain fondu, et/ou à des ajouts d'oxydes ou des contaminations externes dans le bain de fusion. Pour finir, nous avons noté la présence de « bosses » de tension lors de la montée en courant sur certains essais en comportement 1. Elles sont causées par une concomitance de plusieurs facteurs antagonistes et dépendants les uns des autres, mais liés à la baisse de la force de contact ;

- Principalement pour l'intensité I_3 , nous avons été confrontés à des cas d'auto-ouverture à l'approche de l'intensité crête de courant. Ces cas particuliers n'ont pas été détaillés car nous nous intéressons au collage dynamique dû à l'arc lors du rebond à la fermeture.

Pour connaître les critères menant aux cycles de comportement 1 et 2, nous avons ensuite cherché quelle était l'influence de la contrainte thermique It de l'arc, qui est une image de son énergie. Cette contrainte semble être un critère important pour le passage d'un essai 1 à un essai 2, car plus elle est élevée, plus la surface de contact soudée à la fin du rebond sera élevée. Cependant nous n'avons pas observé de valeur limite franche sur les échantillons de chaque intensité. En effet d'autres phénomènes comme la dégradation de la surface par l'arc (rugosité, oxydes) ou le potentiel mouvement du pied d'arc influent sur la taille de la surface réelle de contact.

La troisième partie de ce chapitre a été consacrée à la simulation des essais dynamiques en comportement 1 et 2 grâce au modèle par analogie. Il nous a aidé à confirmer les interprétations sur les formes des cycles UI en complétant les mesures électriques expérimentales par le calcul de la température et du rayon de contact tout au long de l'essai. Nous avons également défini les instants où les couples (tension de contact, température de contact) satisfont la formule de Kohlrausch.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la force de collage mesurée à la fin des essais sur le gabarit « contact électrique dynamique ». Pour étudier le phénomène de collage purement dynamique, nous nous sommes focalisés sur les essais menant à des cycles de comportement 2. En effet ce sont eux qui subissent l'arc de rebond, mais sans atteindre la fusion vers l'intensité crête lorsque le contact est fermé. Nous avons obtenu des forces de collage faibles, globalement comprises entre 0 N et 3 N, ce qui nous conforte dans le choix de l' AgC comme matériau reconnu pour sa résistance au collage. Conformément à la théorie, nous avons trouvé des forces de collage qui ont tendance à augmenter avec la contrainte thermique imposée par l'arc de rebond.

Pour conclure ce chapitre, nous avons cherché à connaître les matériaux présents

dans l'arc lors du rebond, et à définir quelle est leur influence sur la force de collage mesurée à la fin de l'essai. Pour cela, nous avons mis en place un diagnostic par imagerie rapide munie de filtres interférentiels pour l'argent et le graphite, ainsi qu'une mesure spectroscopique de l'arc de rebond. La présence d'argent dans l'arc a été confirmée par sa visualisation à la vidéo ainsi que par ses raies caractéristiques sur le spectre de l'arc. Cependant la présence de carbone et de cuivre n'a pas pu être confirmée par ces deux outils de diagnostic. Pour compléter ces observations, nous avons alors décidé d'analyser les surfaces des électrodes. Cependant cette analyse est réalisée sur des surfaces ayant subi 10 essais successifs, essais dont la durée du rebond et le comportement 1 ou 2 sont différents pour chaque échantillon. Nous avons ainsi pu affirmer que le revêtement en argent a été détruit et que le cuivre a été attaqué, soit lors de l'arc, soit lors du plateau de fusion à fort courant, pour au moins un des 10 tests réalisés sur l'échantillon analysé. La part de cuivre impliquée dans l'arc ou la fusion à fort courant est également plus importante pour les essais à l'intensité I_3 .

Pour mieux établir le lien entre force de contact et matériaux présents dans l'arc de rebond, plusieurs pistes d'amélioration sont envisageables :

- Modifier le dispositif de spectroscopie, avec un spectromètre ayant une meilleure résolution spectrale et/ou en doublant le dispositif pour avoir deux angles de vue différents. Nous pouvons également envisager de faire de la spectroscopie résolue en temps afin d'obtenir la composition du plasma à différents instants de l'arc de rebond ;
- Modifier le protocole de test en ne testant qu'une seule fois chaque échantillon. Cette option est chronophage, mais elle permettrait de s'affranchir du vieillissement des surfaces de contact et de la diminution de la force de collage associée.

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre de l'étude et de la compréhension de la physique du contact électrique, en s'intéressant plus particulièrement à la problématique de collage du contact qui est la conséquence d'un échauffement trop élevé des matériaux. L'approche retenue pour étudier les phénomènes d'échauffement est avant tout expérimentale, avec la mise au point et l'utilisation de deux équipements pertinents nous permettant d'étudier chacun un type de collage (le collage statique et le collage dynamique), ainsi que des moyens de diagnostic et d'analyse variés : mesures électriques et mécanique, microscopie optique et électronique, imagerie rapide et spectroscopie optique. Nous avons ensuite complété cette approche par une simulation des échauffements du contact afin de valider certaines hypothèses faites durant l'interprétation des résultats expérimentaux.

Le premier chapitre a eu pour objectif de définir le contexte ainsi que la problématique de notre étude. Il nous a d'abord permis d'avoir un aperçu de la diversité des contacts dans le réseau électrique français, comme un témoin du fort intérêt de cette étude et de son grand champ d'applications. Puis nous nous sommes intéressés aux produits de protection présents dans ce réseau, et plus particulièrement au contact de coupure du disjoncteur modulaire basse tension. Une fois les fonctions et le cahier des charges de ce contact passés en revue, l'origine de ses échauffements lors du passage de courant a été détaillée, ainsi que les paramètres expérimentaux pouvant avoir une incidence sur ses échauffements. Nous avons alors défini la problématique de collage qui est le sujet de ce travail de thèse. C'est le dépassement de la température de fusion des matériaux qui induit une soudure, appelée collage potentiel. Ce collage potentiel est problématique lorsque la force d'ouverture du contact ne parvient pas à casser la soudure en place. Dans ce cas, la soudure est qualifiée de collage et le disjoncteur ne peut plus assurer son rôle de protection en limitant et en coupant le courant de surcharge, ce qui peut occasionner de graves dommages sur les biens et les personnes.

Le deuxième chapitre a synthétisé les résultats de la littérature sur ces problématiques de collages statique et dynamique. Pour le collage statique, nous avons principalement décrit un outil de mesure de la température du contact que nous avons utilisé dans nos tests. La mesure directe de température étant très délicate vu la géométrie des électrodes testées, c'est cette méthode de mesure indirecte, utilisant la formule de Kohlrausch, qui a été retenue. Grâce à cette formule, la température du contact peut être déduite de

la tension à ses bornes qui est plus facilement mesurable. Nous avons ensuite détaillé les deux types de caractéristiques UI (comportements 1 et 2) pouvant être mesurées durant le passage de l'onde de courant dans un contact. Ces caractéristiques sont un outil d'analyse important puisqu'elles permettent de voir si la fusion des matériaux est atteinte, et de suivre l'évolution de la température de contact si les conditions expérimentales d'utilisation de la formule de Kohlrausch sont réunies. La deuxième partie du chapitre a regroupé les éléments bibliographiques sur le thème du collage dynamique dans le cas d'un arc créé par le rebond à la fermeture du contact de coupure. Nous avons détaillé l'influence des paramètres expérimentaux sur la force de collage dynamique, notamment l'intensité du courant d'arc qui a tendance à faire augmenter la force de collage. Puis nous avons expliqué la différence entre la surface fondue, observable au microscope, et la surface soudée qui est plus petite et qui participe à la force de collage. Les caractéristiques anti-collage de l' AgC ont également été détaillées pour expliquer ce choix de matériau en tant que pastille de contact du disjoncteur étudié. Dans ce chapitre sur l'état de l'art du collage, nous avons également défini les relations théoriques qui permettent de calculer les forces de collage statique et dynamique maximum pour un contact, cette information étant très utile pour le dimensionnement de la force d'ouverture du contact de coupure.

Pour l'étude expérimentale des échauffements liés aux phénomènes de collages statique et dynamique, deux gabarits expérimentaux ont été mis en place. Le troisième chapitre nous en a donné leur description ainsi que le détail de l'ensemble des outils de diagnostics utilisés. Les résultats des tests réalisés sur ces gabarits ont été présentés dans les chapitres 4 et 5.

Pour caractériser les échauffements en statique (chapitre 4), nous avons fait passer à deux reprises une onde de courant se rapprochant d'une demi-onde sinusoïdale de fréquence 50 Hz dans un contact de coupure du disjoncteur modulaire, sans séparation des électrodes entre les deux tests. Les principales conclusions de notre étude en statique sont les suivantes :

- Les caractéristiques UI obtenues expérimentalement sont cohérentes avec les données de la littérature. Elles ont été complétées par le modèle par analogie descriptif pour les essais en comportement 1 afin de visualiser l'évolution du rayon de contact permettant d'expliquer la forme des courbes UI . Pour les essais en comportement 2, avec un rayon de contact constant, c'est le modèle multiphysique qui a complété les données expérimentales.
- Les échauffements pendant la première décharge sont critiques et peuvent mener à la fusion des matériaux de contact, contrairement aux échauffements pendant la deuxième décharge qui sont nettement réduits du fait de la surface de contact plus élevée.
- Pour une force de contact statique fixée à $F_c=6$ N, le courant limite de fusion est d'environ 1750 A pour la première décharge de courant.
- L'augmentation de la force de contact statique F_c repousse le courant limite de fusion pendant la première décharge. Il passe d'environ 1350 A pour $F_c=3$ N

à environ 2050 A pour $F_c=12$ N. Ce résultat est cohérent avec la théorie des échauffements du contact puisqu'une force plus élevée aura tendance à augmenter la taille de la surface de contact, et donc à diminuer la résistance de contact et les échauffements associés.

En complément des analyses des cycles UI , nous avons analysé l'évolution du rayon de contact pendant la première décharge. Nous en avons conclu que le rayon de contact obtenu par microscopie optique était surestimé, surtout pour des faibles valeurs d'intensité I_0 . Le rayon calculé numériquement est plus représentatif du rayon de contact électrique réel.

Forts du système de mesure de température mis en pratique dans les tests du chapitre 4, nous avons au chapitre 5 étudié le collage dynamique au travers de l'arc lors du rebond à la fermeture. Nous en avons tiré plusieurs conclusions :

- Après le rebond, les cycles UI se font soit en comportement 1, soit en comportement 2. Le basculement d'un comportement à l'autre est fonction de la taille de la surface de contact, comme nous l'avons vu au chapitre 4. Cette taille à la fin du rebond semble être le résultat de plusieurs paramètres. La contrainte thermique It de l'arc de rebond, image de son énergie, semble être un critère qui augmente la taille de la surface de contact en favorisant un comportement 2. Mais elle n'est pas le seul paramètre. En effet, la détérioration des surfaces de contact induite par l'arc de rebond (rugosité, oxydes, bourrelets) est un effet antagoniste qui a tendance à réduire la taille de la surface de contact, et donc à privilégier un comportement 1.
- Les courbes UI obtenues sur cet équipement en dynamique sont dans l'ensemble bien plus perturbées que celles obtenues avec l'équipement en statique, avec notamment de fortes oscillations et des « bosses » de tension. Elles sont dues à la détérioration des surfaces par l'arc de rebond, ainsi que par l'instabilité mécanique liée au caractère dynamique de l'expérience (oscillations de force après le choc de la fermeture, mouvements relatifs d'une électrode par rapport à l'autre).
- La simulation des essais dynamiques grâce au modèle par analogie nous a permis de définir l'origine des « bosses » de tension, et de définir des instants où les couples (tension de contact, température de contact) satisfont la formule de Kohlrausch.
- Les forces de collage dynamique mesurées lors de nos essais sont faibles, ce qui est en accord avec le choix de l' AgC en tant que matériau reconnu pour sa résistance au collage. Ces forces ont tendance à augmenter avec la contrainte thermique de l'arc de rebond.
- Les diagnostics optiques (spectroscopie et imagerie rapide avec filtres interférentiels) et matériaux (microscopie optique et électronique) ne nous ont pas permis d'établir un lien entre la force de collage mesurée et les matériaux présents dans l'arc de rebond, notamment à cause de la multiplicité des essais réalisés sur un même échantillon, et de la trop faible résolution spectrale du spectromètre.

L'ensemble de ces travaux ont souligné l'importance de la collaboration entre le laboratoire GREMI et l'entreprise Hager, tant pour la partie expérimentale que pour la partie simulation. La réorganisation des expériences sur le site d'Hager, liée aux contraintes apportées par la Covid-19, ne nous a pas permis de bénéficier de tout le matériel de diagnostic du laboratoire initialement envisagé. Nous aurions par exemple pu profiter pour l'étude en dynamique d'un spectromètre ayant une meilleure résolution spectrale, ou doubler le nombre de spectromètres pour avoir deux angles de vue différents.

Bien que la démarche d'étude fût principalement expérimentale lors de cette thèse, la partie simulation gagne également à être développée dans l'avenir avec un modèle numérique multiphysique prenant en compte le changement de phase des matériaux, notamment à la fusion, et le couplage mécanique afin de calculer l'évolution du rayon de contact, et ainsi pouvoir modéliser les essais en comportement 1.

Plus généralement, les perspectives de ce travail sont nombreuses. Le gabarit expérimental pour l'étude du collage statique pourrait être amélioré en ajoutant la mesure de la force de collage après la soudure du contact. Nous pourrions aussi réaliser après essai des coupes métallographiques des électrodes de contact pour caractériser la profondeur et la composition des couches impactées thermiquement par le passage du courant et par l'arc de rebond le cas échéant, ce qui nous permettrait de bénéficier de données supplémentaires intéressantes pour notre étude. Les deux équipements pourraient également être utilisés pour des contacts de coupure provenant d'autres produits de protection, notamment avec des matériaux différents. L'étude sur l'échauffement pourrait aussi être étendue à d'autres types de contacts comme les contacts glissants, ou encore pour caractériser la qualité du collage entre la pastille et son support, d'un point de vue électrique et thermique.

Pour finir, les deux équipements utilisés dans ce travail de thèse se sont révélés suffisamment réalistes pour envisager par la suite une présélection des contacts de coupure avant la réalisation plus coûteuse d'essais à grande échelle sur des produits de protection. Pour améliorer la technicité de ces produits, le gabarit statique nous permettrait par exemple de définir les paramètres optimaux de force de contact mécanique et de matériaux pour éviter la fusion des matériaux, et donc le collage.

Bibliographie

- [1] Cours en ligne. <https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/cours/optimisation-du-transport-de-lenergie/54773/>. Consulté le 25/10/2021.
- [2] R. Holm. *Electric Contacts. Theory and Application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1967.
- [3] Photographie du poste de transformation de l'entreprise RTE situé en France à Super-Besse. <https://lafibre.info/electricite/poste-transformation-rte/>. Forum consulté le 23/07/2021.
- [4] R. Morel. Cahiers Techniques n°154 de Schneider Electric : Techniques de coupure des disjoncteurs BT. <https://www.se.com/fr/fr/download/document/ct154/>.
- [5] L. Siffroi. *Le Contacteur électromagnétique*. Ed. Centre international technique d'enseignement et de formation, 1988.
- [6] J. Quémeneur. *Étude des forces à l'origine du déplacement d'un arc électrique dans un disjoncteur basse-tension*. PhD thesis, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2016.
- [7] J.-M. Bauchire, D. Hong, and F. Gentils. Le disjoncteur basse tension et l'arc électrique. *Plasmas froids - Systèmes et procédés*, pages 197–214, 2008.
- [8] P.-Y. Duvivier. *Étude expérimentale et modélisation du contact électrique et mécanique quasi statique entre surfaces rugueuses d'or : application aux micro-relais mems*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010.
- [9] P. G. Slade. *Electrical Contacts. Principles and Applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 1999.
- [10] C. Fritsch. Formation LCIE interne à hager sur le contact électrique, Septembre 2006.
- [11] M. Sato, M. Hijikata, and I. Morimoto. Influence of temperature in the contact area on the static welding characteristics of electrical contacts. *Trans. Nat. Research Inst. Metals (Japan)*, 15(2), 1970.
- [12] L. Féchant. *Le contact électrique - Phénomènes physiques et matériaux*. Hermes Science Publications, 1996.

- [13] Rapport technique IEC 60943 Deuxième édition 1998-01, 1998.
- [14] J. A. Greenwood. Constriction resistance and the real area of contact. *British Journal of Applied Physics*, 17(12) :1621–1632, dec 1966.
- [15] J.D. Lavers. Effect of signal frequency on constriction resistance. In *20th International Conference on Electrical Contacts (ICEC) 2000*, pages 29–34, 2000.
- [16] R. Meyer. Étude des transitoires électriques et thermiques dans une électrode soumise à une décharge électrique. Thèse d’État. *Université de Paris 11*, 1994.
- [17] N. Ben Jemaa, X. Hernot, A. El Manfalouti, A. Senouci, and R. El Abdi. Theoretical and experimental investigation of contact resistance under low and medium force indentations for common and for new coated materials. In *Conference : 21th International Conference on Electrical Contacts, Zurich, Switzerland*, 2002.
- [18] L. Féchant. Appareillage électrique à basse tension. Généralités. Principes. Technologie. Techniques de l’Ingénieur, Décembre 1984.
- [19] Site de l’entreprise Sensor Products Inc. <https://www.sensorprod.com/news/white-papers/pbg/index.php>. Consulté le 02/08/2021.
- [20] P. G. Slade. *The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2007.
- [21] A. C. Snowdon. Studies of electrodynamic forces occurring at electrical contacts. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II : Applications and Industry*, 80(1) :24–28, 1961.
- [22] E. D. Taylor and P. G. Slade. The repulsion or blow-off force between closed contacts carrying current. In *2016 IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, 2016.
- [23] R. Michal and K.E. Saeger. Application of silver-based contact materials in air-break switching devices for power engineering. In *Electrical Contacts, 1988., Proceedings of the Thirty Fourth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 121–127, 1988.
- [24] V. Berhens, E. Mahle, R. Michal, and K.E. Saeger. An advanced silver/graphite contact material based on graphite fibre. In *16th International Conference on Electrical Contacts, Loughborough (UK)*, pages 185–189, 1992.
- [25] L. Féchant and P. Tixador. *Matériaux conducteurs et de contact électrique*. Lavoisier, 2003.
- [26] A. Bonhomme. *Comportement à l’usure de pastilles de contacts électriques à matrice argent*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.

- [27] P.C. Wingert. The effects of interrupting elevated currents on the erosion and structure of silver-graphite. In *Electrical Contacts - 1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts*, pages 60–69, 1996.
- [28] E. Walczuk. Arc erosion of high current contacts in the aspect of cad of switching devices. In *Electrical Contacts - 1992 Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 1–16, 1992.
- [29] E. Vinaricky. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [30] B. W. Turner and C. Turner. Phenomena relating to temperature rise and welding in high current electric contacts. In *4th International Research Symposium on Electrical Contact Phenomena 1968*, pages 168–171, 1968.
- [31] P. G. Slade. The current level to weld closed contacts. In *2013 IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013)*, pages 1–7, 2013.
- [32] R. Landfried, T. Leblanc, R. Andlauer, T. Klonowski, and Ph. Teste. Temperature measurement of copper contact surfaces. In *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 1–5, 2010.
- [33] F. Kohlrausch. Ueber den stationären temperaturzustand eines elektrisch geheizten leiters. *Annalen der Physik*, 306(1) :132–158, 1900.
- [34] Y. Sano and T. Kaneko. Applicability and correction of temperature-voltage relation in the case of point contact. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology : Part A*, 21(2) :345–351, 1998.
- [35] E. Walczuk. Resistance and temperature variations heavy current contacts in welding conditions. In *10th International Conference on Electric Contact Phenomena, Budapest (Hungary), 1980*, pages 367–375, 1980.
- [36] E. Walczuk. Volt-current characteristics and resistance of high-current closing contact during the welding. In *8th International Conference on Electrical Contact Phenomena, Tokyo (Japan), 1976*, pages 245–250, 1976.
- [37] E. Yee Kin Choi. *Étude des arcs et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts électriques de puissance pour des applications DC*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2015.
- [38] A. Tslaf. A thermophysical criterion for the weldability of electric contact material in a steady-state regime. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 5(1) :147–152, 1982.
- [39] X. Dégot and L. Féchant. Schweiß- und Abhebegrenzen an geschlossenen Silberkontakten bei Stromfluss. *ETZ-A*, 1969.

- [40] X. Dégot. Limites de soudure et de répulsion observées lors du passage de courants à travers des contacts en molybdène maintenus fermés. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, pages 75–78, 1970.
- [41] H.J. Mau. A method for determining the current-carrying capacity of closed contacts. In *8th International Conference on Electrical Contact Phenomena, Tokyo (Japan), 1976*, pages 251–256, 1976.
- [42] H.J. Mau. Stand der Erkenntnisse über die Beanspruchung elektrischer Kontakte in der Strakstromtechnik. In *5th International Conference on Electrical Contacts, Munich (Germany), 1970*, pages 29–51, 1970.
- [43] F. Hannachi. *Modélisation d'un contact électrique soumis à une contrainte mécanique*. PhD thesis, Faculté des Sciences de Nancy 1, 1988.
- [44] P. Koren, M. Nahemow, and P.G. Slade. The molten metal bridge stage of opening electrical contacts. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 11(1) :4–10, 1975.
- [45] L. Morin. *Étude expérimentale des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contact. Application aux commutateurs automobiles de puissance*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2000.
- [46] M J Price and F Llewellyn Jones. The electrical contact : the properties and rupture of the microscopic molten metal bridge. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2(4) :589–596, 1969.
- [47] A.R. Neuhaus, W.F. Rieder, and M. Hammerschmidt. Influence of electrical and mechanical parameters on contact welding in low power switches. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 27(1) :4–11, 2004.
- [48] K. Hotta and T. Inaguchi. Dependence of contact weld force on arc energy supplied to contact surface in low voltage switches. In *2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, pages 160–165, 2015.
- [49] K. Hotta and T. Inaguchi. Contact welding mechanism with bounce arc on ag and cu contacts in low-voltage switches. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(3) :363–370, 2017.
- [50] E. Walczuk and D. Boczkowski. Computer controlled investigations of the dynamic welding behavior of contact materials. In *Electrical Contacts - 1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts*, pages 11–16, 1996.
- [51] C. Poulain and J. Devautour. Parametric study of the dynamic welding of power electrical contacts. In *International Conference on Electrical Contacts, Nüremberg (Germany), 1998*, pages 343–347, 1998.

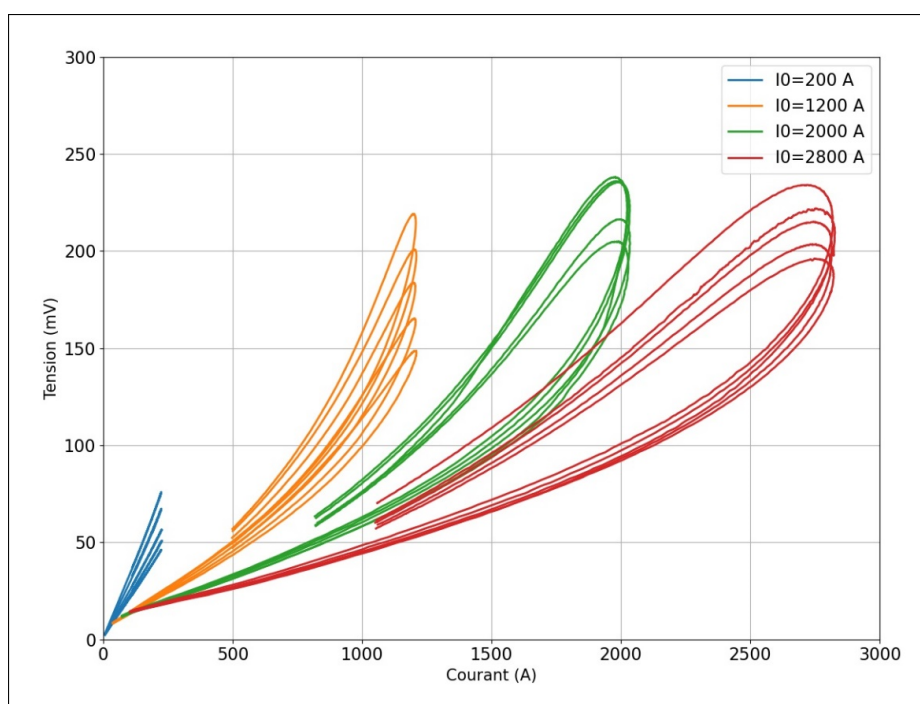
- [52] T. Mutzel, M. Bender, and R. Niederreuther. The effect of material composition on dynamic welding of electrical contacts. In *2013 IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013)*, pages 1–7, 2013.
- [53] T. Kubono. A theory for the cathode mechanism in low-current vacuum arcs, with application to the calculation of erosion rate. *Journal of Applied Physics*, 49(7) :3863–3869, 1978.
- [54] T. Kubono. The evaporation rate from a single cathode spot on precious metal electrodes in vacuum arcs. *Journal of Applied Physics*, 50(12) :7958–7964, 1979.
- [55] F. Pons. *Érosion suite à l'impact d'un arc électrique : Modélisation et campagnes expérimentales en vue du développement d'un matériau de substitution à l'alliage AgCdO*. PhD thesis, Université Paul Verlaine de Metz, 2010.
- [56] T. Mutzel and R. Niederreuther. Development of contact material solutions for low-voltage circuit breaker applications (2). In *2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, pages 1–6, 2011.
- [57] L. Kogut and K. Komvopoulos. Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces separated by a thin insulating film. *Journal of Applied Physics*, 95(2) :576–585, 2004.
- [58] M. Leidner, H. Schmidt, and M. Myers. Simulation of the current density distribution within electrical contacts. In *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 1–9, 2010.
- [59] G. Déplaude. *Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire*. PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2017.
- [60] J. Faerber. Cours sur le MEB. Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, Octobre 2007.
- [61] Site du laboratoire GREMI. <https://www.univ-orleans.fr/fr/gremi>. Consulté le 28/07/2021.
- [62] Y. Lembeye. *Méetrologie de la Commutation de Puissance Rapide. Contribution à la Caractérisation et à la Recherche d'un Modèle d'I.G.B.T.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2013.
- [63] Site du logiciel COMSOL, www.comsol.fr.
- [64] Page "Capacité thermique massique du cuivre" de wikipédia. Consultée le 14/01/2021.
- [65] Y.S. Touloukian. *Thermal Conductivity. Metallic Elements and Alloys*. Dunod, 1978.
- [66] *Handbook of Chemistry and Physics (72nd Edition)*. CRC Press, 1991.

- [67] J.-B. Saulnier and A. Alexandre. La modélisation thermique par la méthode nodale : ses principes, ses succès et ses limites. *Revue Générale de Thermique*, (280) :363–372, 1985.
- [68] Cours en ligne sur les diagrammes de phases, de P. Millet, [http ://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/diagramme/site/html/cours.pdf](http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/diagramme/site/html/cours.pdf).
- [69] Site de Kurucz qui répertorie les longueurs d’ondes des raies spectrales et des données spectroscopiques. [https ://lweb.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html](https://lweb.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html). Consulté le 26/08/2021.
- [70] R. A. Matula. Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 8(8) :1147–1298, 1979.

Annexes

Annexe A

Courbes UI caractéristiques obtenues pour des contacts préalablement soudés pour des intensités crêtes I_0 croissantes.



Annexe B

Résistivités électriques, capacités thermiques massiques et les conductivités thermiques utilisées pour l'argent et du cuivre.

Température °C	Résistivité Ag [12] $\Omega.m$
0	1.47E-08
20	1.61E-08
27	1.65E-08
127	2.35E-08
227	3.04E-08
327	3.74E-08
427	4.43E-08
527	5.13E-08
627	5.82E-08
727	6.52E-08
827	7.22E-08
927	7.91E-08
962	1.73E-07
1027	1.79E-07
1127	1.87E-07
1227	1.95E-07
1327	2.04E-07

Température °C	Résistivité Cu [70] $\Omega.m$
-73.15	1.05E-08
-23.15	1.39E-08
0	1.54E-08
19.85	1.68E-08
26.85	1.73E-08
76.85	2.06E-08
126.85	2.40E-08
226.85	3.09E-08
326.85	3.79E-08
426.85	4.51E-08
526.85	5.26E-08
626.85	6.04E-08
726.85	6.86E-08
826.85	7.72E-08
926.85	8.63E-08
1026.85	9.59E-08
1084.45	1.0171E-07
1084.45	2.101E-07
1126.85	2.143E-07
1226.85	2.242E-07
1326.85	2.342E-07
1426.85	2.441E-07

Température °C	Conductivité thermique Ag [65] $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
-23.15	4.30E+02
0.05	4.28E+02
26.85	4.26E+02
76.85	4.22E+02
126.85	4.19E+02
226.85	4.11E+02
326.85	4.04E+02
426.85	3.96E+02
526.85	3.89E+02
626.85	3.81E+02
726.85	3.74E+02
826.85	3.67E+02
926.85	3.59E+02
960.85	3.57E+02
961.85	1.75E+02
1026.85	1.78E+02
1126.85	1.82E+02
1226.85	1.86E+02
1326.85	1.89E+02
1426.85	1.92E+02
1526.85	1.94E+02
1626.85	1.95E+02
1726.85	1.97E+02
1926.85	1.98E+02
2126.85	1.98E+02
2326.85	1.96E+02
2526.85	1.94E+02
2726.85	1.90E+02
2926.85	1.86E+02
3126.85	1.80E+02
3326.85	1.75E+02
3526.85	1.68E+02
3726.85	1.62E+02
4226.85	1.46E+02
4726.85	1.32E+02
5226.85	1.22E+02
5726.85	1.19E+02
6226.85	1.26E+02
6726.85	1.44E+02
7186.85	1.73E+02

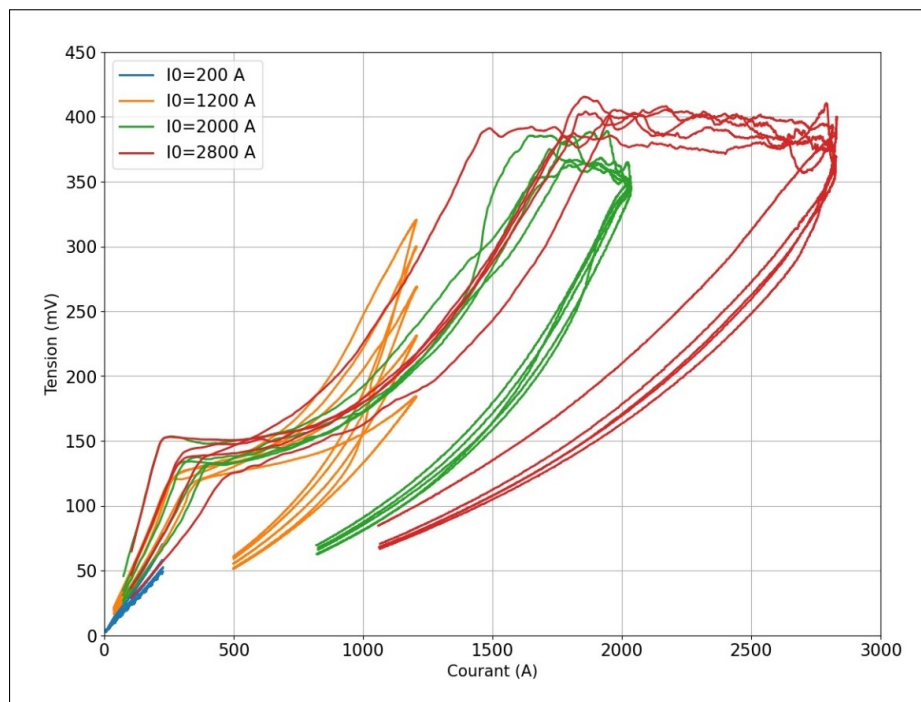
Température °C	Conductivité thermique Cu [65] $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
-23.15	4.03E+02
0.05	4.01E+02
26.85	3.99E+02
76.85	3.96E+02
126.85	3.93E+02
226.85	3.86E+02
326.85	3.79E+02
426.85	3.72E+02
526.85	3.66E+02
626.85	3.59E+02
726.85	3.52E+02
826.85	3.46E+02
926.85	3.39E+02
1026.85	3.32E+02
1082.85	3.29E+02
1083.85	1.69E+02
1126.85	1.70E+02
1226.85	1.72E+02
1326.85	1.74E+02
1426.85	1.76E+02
1526.85	1.78E+02
1626.85	1.79E+02
1726.85	1.80E+02
1926.85	1.82E+02
2126.85	1.82E+02
2326.85	1.82E+02
2526.85	1.82E+02
2726.85	1.80E+02
2926.85	1.78E+02
3126.85	1.75E+02
3326.85	1.72E+02
3526.85	1.68E+02
3726.85	1.63E+02
4226.85	1.50E+02
4726.85	1.34E+02
5226.85	1.16E+02
5726.85	9.74E+01
6726.85	5.82E+01
7726.85	2.11E+01
8226.85	4.85E+00

Température °C	Capacité thermique massique Ag [12] $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
0	2.35E+02
27	2.37E+02
127	2.40E+02
227	2.43E+02
327	2.49E+02
427	2.56E+02
527	2.63E+02
627	2.70E+02

Température °C	Capacité thermique massique Cu [64] $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
0	3.84E+02
25	3.85E+02
96	3.94E+02
131	3.99E+02
166	4.03E+02
202	4.06E+02
237	4.10E+02
272	4.13E+02
308	4.16E+02
343	4.19E+02
378	4.22E+02
414	4.24E+02
449	4.27E+02
484	4.29E+02
520	4.32E+02
555	4.34E+02
838	4.66E+02
873	4.72E+02
908	4.78E+02
944	4.86E+02
979	4.94E+02
1014	5.03E+02
1050	5.13E+02
1085	5.24E+02
1200	6.07E+02
1500	4.39E+02
1800	3.76E+02
2000	3.64E+02
2570	3.84E+02
2781	4.00E+02
2886	4.08E+02
2991	4.17E+02
3096	4.25E+02

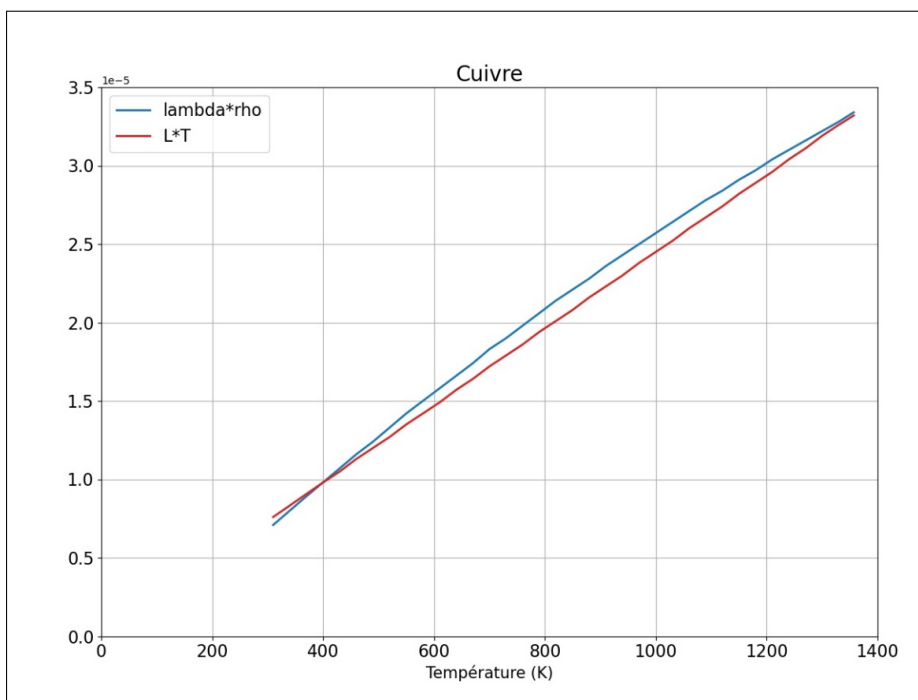
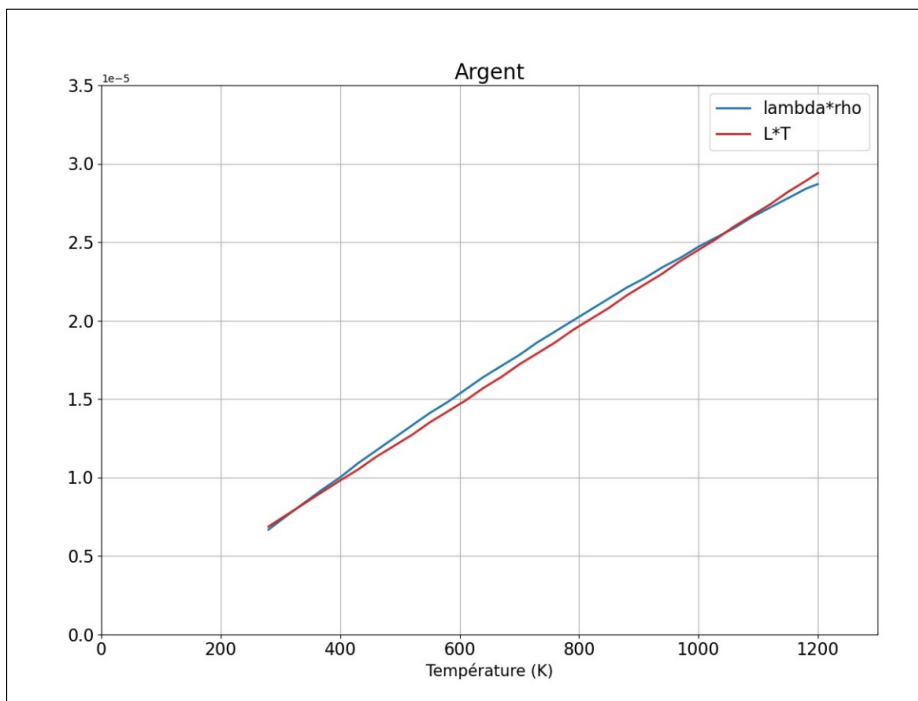
Annexe C

Courbes UI caractéristiques obtenues lors de la première décharge de courant pour des intensités crêtes I_0 croissantes.



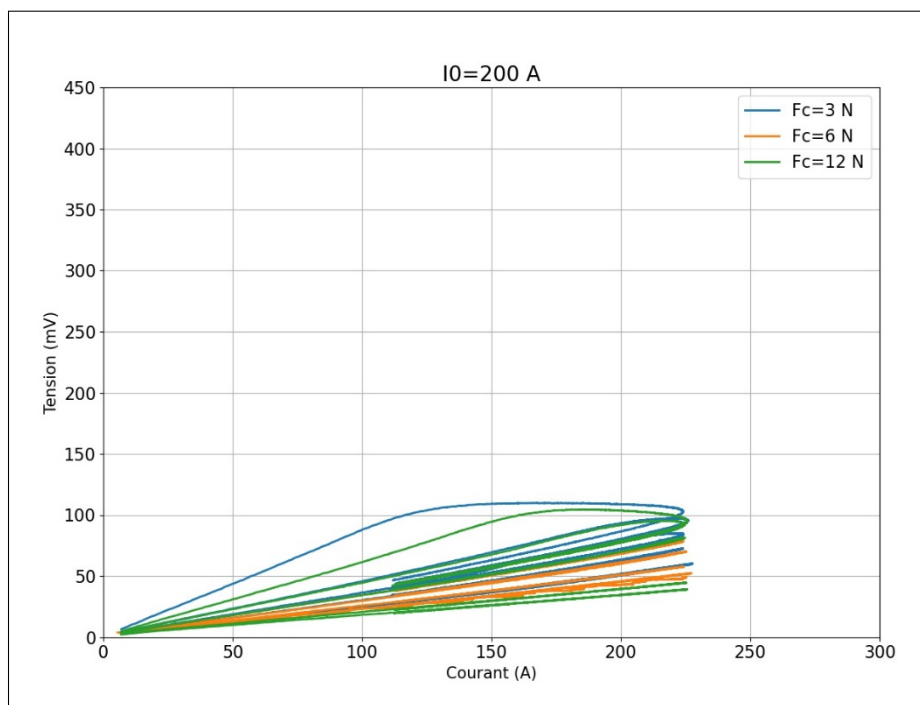
Annexe D

Vérification de la loi de Wiedman-Franz pour l'argent et le cuivre sur une gamme de températures allant de la température ambiante à la température de fusion de ces matériaux. Les unités de la conductivité thermique λ , de la résistivité électrique ρ et de la constante de Lorentz L sont dans le système international.

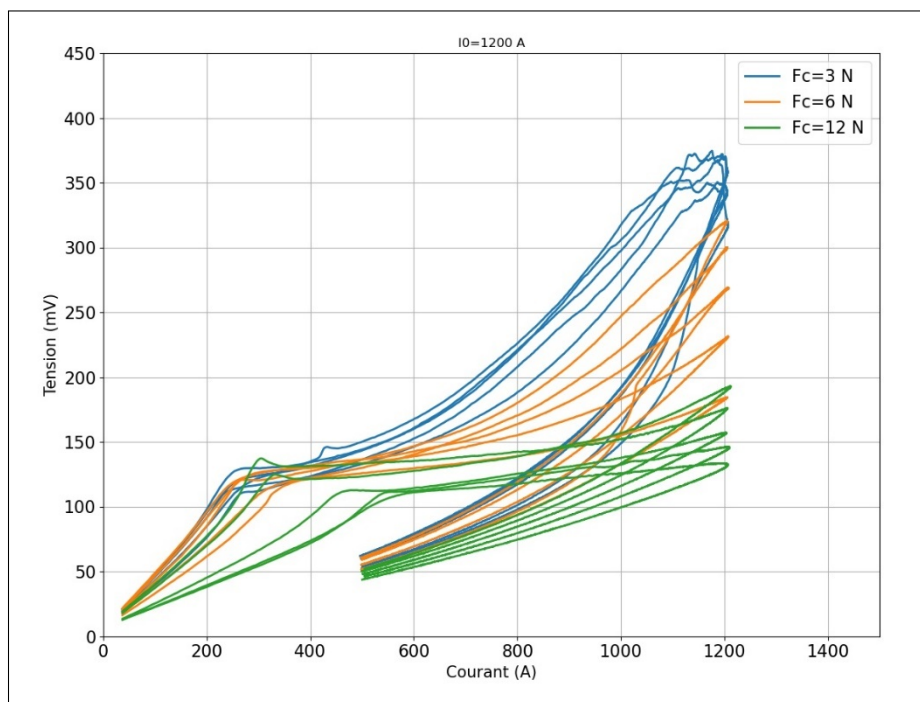


Annexe E

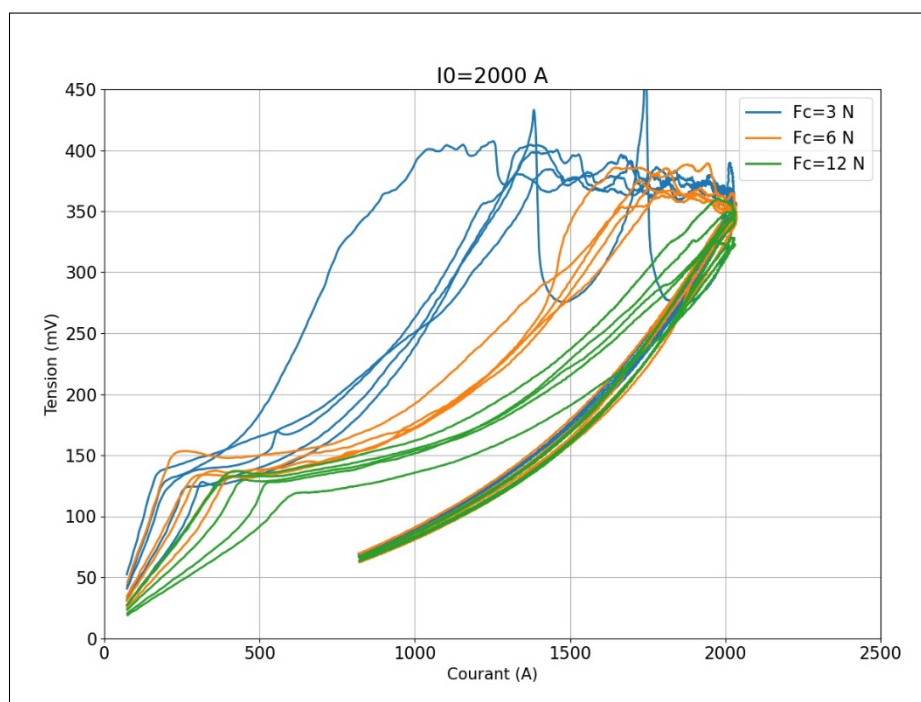
Courbes UI caractéristiques obtenues lors de la première décharge de courant à $I_0 = 200 \text{ A}$ pour des forces de contact statique F_c croissantes.



Courbes UI caractéristiques obtenues lors de la première décharge de courant à $I_0 = 1200 \text{ A}$ pour des forces de contact statique F_c croissantes.



Courbes UI caractéristiques obtenues lors de la première décharge de courant à $I_0 = 2000 \text{ A}$ pour des forces de contact statique F_c croissantes.



Marion KUBLER-RIEDINGER

Étude de l'échauffement des contacts dans un disjoncteur basse tension. Influence de l'arc électrique sur le collage des contacts.

Résumé :

Le disjoncteur basse tension est un produit de protection présent dans les installations électriques. À l'apparition d'un défaut électrique, son rôle est de détecter, limiter et interrompre le courant de surcharge afin d'éviter les dommages sur les biens et les personnes. L'ouverture du contact de coupure du disjoncteur est une étape clé qui conditionne le reste de l'opération de coupure. Il arrive cependant que les échauffements dus au courant de surcharge soient tels que les matériaux de ce contact fondent et entraînent un collage du contact électrique, rendant ainsi son ouverture plus difficile.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les deux types de collages : le collage statique qui résulte d'un échauffement dû à la constriction des lignes de courant, et le collage dynamique causé par la présence d'un arc électrique. Deux gabarits expérimentaux ont permis de déterminer les phénomènes physiques menant au collage et de trouver les paramètres limites permettant d'empêcher son apparition. Pour l'étude du collage statique, nous avons réalisé des mesures électriques sur des contacts fermés pour en déduire leur température lors du passage d'un courant de forte intensité. Une analyse des surfaces de contact pré- et post-essai est venue compléter ces mesures. Puis, lors de l'étude du collage dynamique, nous avons utilisé cette évaluation de température pour caractériser les échauffements dans un contact ayant subi un arc électrique pendant un rebond à la fermeture. Des modèles numériques ont également été développés pour interpréter les phénomènes d'échauffement observés expérimentalement.

Mots clés : disjoncteur basse tension, contact électrique, échauffement, arc électrique, collage, court-circuit

Study of contact heating in a low-voltage circuit breaker. Influence of the electric arc on contact welding.

Summary:

The low-voltage circuit breaker is a protective device used in electrical installations. When an electrical fault occurs, its role is to detect, limit and interrupt the overcurrent to avoid damage to goods and people. The opening of the breaking contact of the circuit-breaker is a crucial step which conditions the rest of the breaking operation. However, it happens that the overcurrent heats up so much that the materials of this contact melt and lead to a welding of the electrical contacts, making it more difficult to open.

The objective of this PhD thesis is to study the two types of welding: static welding, which results from heating due to the constriction of the current lines, and dynamic welding caused by the presence of an electric arc. Two experimental setups were used to determine the physical phenomena leading to welding and to find the limiting parameters to prevent its occurrence. For the study of static welding, we carried out electrical measurements on closed contacts to determine their temperature during the passage of a high current. These measurements were complemented by an analysis of the contact surfaces before and after the test. For the study of dynamic welding, we used this temperature assessment to describe the heating caused by an electrical arc during a rebound at closure. Numerical models were also developed to interpret the experimentally observed heating phenomena.

Keywords: low-voltage circuit breaker, electrical contact, heating, electrical arc, contact welding, short-circuit