

ECOLE DOCTORALE :
ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE ISTO

THÈSE présentée par :

Carlos ALDANA

soutenue le: **17 juin 2019**

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

Discipline/S spécialité: *Géosciences*

Etude des propriétés de transfert de la zone non saturée.

Application aux Calcaires Aquitaniens de l'aquifère de Beauce

THÈSE dirigée par :

Yves COQUET
Ary BRUAND

Professeur, AgroParisTech
Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Claude HAMMECKER
Christelle MARLIN

Chargé de recherche, IRD
Professeur, Université Paris Sud

JURY :

Isabelle COUSIN
Laurent LASSABATERE
Christophe POINCLOU

Directrice de recherche, INRA Orléans
Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat, ENTPE
Ingénieur, ANTEA Group Orléans

REMERCIEMENTS

Après un long chemin parcouru lors des trois dernières années, mon projet de recherche arrive à la fin avec beaucoup de souvenirs et de satisfaction. La finalisation de cette étape, très importante dans ma vie professionnelle et personnelle, a été possible grâce à plusieurs personnes qui ont apporté un soutien inconditionnel pendant les moments difficiles. Ses implications professionnelles et personnelles ont été la clé pour la réussite de mon travail de recherche.

Je voudrais d'abord remercier mes encadrant de thèse, Monsieur Yves COQUET et Monsieur Ary BRUAND, pour la confiance qu'ils m'ont accordée depuis le premier jour d'encadrement jusqu'à la soutenance. Je tiens particulièrement à remercier Monsieur COQUET pour son implication dans le projet ainsi que la qualité scientifique apportée pendant chaque séance de travail. Son expérience a été la clef de voûte pour le développement de ce travail de recherche.

Je voudrais également remercier mon collègue, Arnaud ISCH qui m'as toujours accompagné dans la démarche scientifique et technique. Après mon encadrant, Arnaud a été la personne la plus impliquée dans mon projet de thèse. Dès le début, il a montré une initiative très dynamique, optimiste et communicative qui a représenté une motivation pour avancer, notamment dans les difficultés. Son soutien sera toujours très apprécié.

Je tiens particulièrement à remercier les membres du jury de thèse qui ont accepté de faire partie de cette étape si importante : Claude HAMMECKER, Christelle MARLIN, Isabelle COUSIN, Laurent LASSABATERE et Christophe POINCLOU. Monsieur POINCLOU a été l'une de personne qui m'a aussi accompagné dans la démarche scientifico-technique. Grâce à sa vaste expérience, ses conseils m'ont permis de résoudre les problèmes techniques.

J'adresse également mes remerciements aux membres du laboratoire de l'ISTO qui ont apporté sa collaboration à chaque instant sollicité : Marielle HATTON, Nathalie ROLLAND, Nathalie LOTTIER, Olivier GAUDEFRY, Hassan ALMAJOU, Ida DI CARLO, Sylvain JANIEC. Je voudrais remercier l'équipe de l'atelier pour sa participation dans les réunions techniques et ses conseils précieux pour la conception du dispositif expérimental : Remy CHAMPALLIER, Frédéric SAVOIE et Estéban LE MOING.

J'en arrive aux remerciements plus personnels dédiés à mes proches. D'abord, je tiens à remercier infiniment ma femme Yanesky, pour sa compréhension et pour son soutien inconditionnel chaque jour, dans les difficultés et dans la prospérité. Merci d'avoir pris soin de nos enfants pendant mon absence. Merci pour ta patience et de m'avoir aidé à atteindre mes objectifs. Ce travail est à toi aussi.

A mes parents et à ma sœur et frère qui m'accompagnent dans la distance. Je leur dédie ce travail.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	22
LISTE DES ANNEXES	26
LISTE DES SYMBOLES	27
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	29
1.1. Objectif de l'étude	30
1.2. Objectifs spécifiques.....	30
1.3. Structure de la thèse.....	32
PARTIE I: CADRE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE ET ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES.....	33
CHAPITRE 2: LA ZONE NON SATUREE	34
2.1. Le cycle hydrologique	34
2.2. La zone critique	35
2.3. La zone non saturée.....	36
CHAPITRE 3: FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE LA ZONE NON SATUREE. Approche théorique	38
3.1. Porosité et distribution de taille des pores	38
3.1.1. Définitions et ordres de grandeur	38
3.1.2. Les facteurs de la porosité efficace	39
3.2. Potentiel de l'eau et capillarité	40
3.3. Teneur en eau et courbe de rétention en eau	42
3.3.1. Effet des propriétés du matériau sur sa courbe de rétention en eau	46
3.3.2. Hystérésis	47
3.4. Les phénomènes de transfert d'eau dans les matériaux de la ZNS.....	48
3.4.1. Ecoulements en milieu saturé	48
3.4.1.1 Loi de Darcy	48
3.4.1.2 Validité et limites de la loi de Darcy	49
3.4.2. Ecoulements en milieu non saturé	51
3.4.2.1 Généralisation de la loi de Darcy	51
3.4.2.2 Equation de Richards	52
3.4.2.3 Equations mathématiques pour décrire la caractéristique de conductivité hydraulique.....	53
CHAPITRE 4: TECHNIQUES D'ETUDE AU LABORATOIRE DES PROPRIETES HYDRIQUES DES MATERIAUX NON SATURES	55
4.1. Presse de Richards	55
4.2. La méthode des deux plaques	56
4.3. La méthode de Wind.....	57
4.4. La méthode par centrifugation	58
4.5. La méthode du perméamètre à paroi flexible (cellule triaxiale).....	60
4.6. La méthode du débit d'extraction en étapes (« steps »).....	65

4.6.1.	La méthode « one-step »	65
4.6.2.	La méthode « multi-step ».....	66
4.6.2.1	Considérations à prendre en compte lors d'un essai multi-step	69
4.6.2.2	Domaine de validité de la méthode	70
4.7.	Technique de translation de pression	71
4.8.	Choix du dispositif.....	74
CHAPITRE 5: ETUDES DE CAS. AQUIFERES ET ZONE NON SATUREE		77
5.1.	Mesure des propriétés hydriques non saturées de couches sédimentaires profondes dans l'Idaho.....	77
5.2.	Analyse du transport de solutés à travers un aquifère alluvial hétérogène dans le site expérimental de Krauthausen.....	78
5.3.	Migration des nitrates dans la zone non saturée de la nappe de la craie dans le nord de la France.	82
5.4.	Etude du fonctionnement hydrique des sols et de la ZNS et étude de la pollution par les nitrates d'origine agricole dans l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain).....	86
PARTIE II: MATERIELS ET METHODES		91
CHAPITRE 6: PRESENTATION DU SITE D'ETUDE		92
6.1.	Description générale de l'aquifère des calcaires de Beauce	92
6.2.	Cadre géologique.....	93
6.2.1.	Stratigraphie	93
6.2.2.	Lithologie	94
6.3.	Qualité des eaux de l'aquifère de Beauce	97
6.4.	Cadre hydrogéologique	98
6.4.1.	Caractéristiques hydrodynamiques.....	99
6.5.	Configuration de l'aquifère à Villamblain	100
6.6.	Le climat.....	102
6.7.	Les sols	103
6.8.	L'agriculture	104
6.9.	Choix du site.....	104
CHAPITRE 7: DISPOSITIF EXPERIMENTAL. Système triaxial non conventionnel		106
7.1.	Caractéristiques mécaniques et géométrie des composantes du dispositif	106
7.1.1.	La cellule triaxiale	107
7.1.1.1	Partie inférieure (piédestal)	107
7.1.1.2	Enceinte cylindrique (cellule)	109
7.1.1.3	Partie supérieure	110
7.1.2.	Les contrôleurs pression-volume (CPV)	110
7.1.3.	Equipement de l'échantillon	112
7.1.3.1	Membrane.....	112
7.1.3.2	Pierre poreuse.....	112
7.1.4.	Phases mobiles utilisées	113
7.1.5.	Accessoires.....	113

7.1.6.	Climatisation	113
7.1.7.	Désaération de la phase liquide.....	114
7.2.	Protocole expérimental de montage des échantillons dans la cellule triaxiale	114
7.2.1.	Saturation de la céramique.....	114
7.2.2.	Montage de l'échantillon.....	115
7.3.	Protocole de montage pour la mesure des propriétés hydriques de la pâte de billes de verres.	118
CHAPITRE 8: MESURE DES PROPRIETES HYDRIQUES A L'AIDE DU SYSTEME TRIAXIAL.....		120
8.1.	Mesure des propriétés hydriques en condition saturée.....	120
8.1.1.	Matériaux meubles de la ZNS	120
8.1.1.1	Saturation de l'échantillon.....	120
8.1.1.2	Validation de la saturation (paramètre B_w)	123
8.1.1.3	Consolidation de l'échantillon.....	126
8.1.1.4	Equations pour le calcul de la conductivité hydraulique à saturation.....	127
8.1.2.	Roches calcaires dures.....	131
8.2.	Mesure des propriétés hydriques en condition non saturée	132
8.2.1.	Schéma du dispositif.....	132
8.2.2.	Etapes de l'essai transitoire (essai multistep)	133
8.2.2.1	Equilibre hydrique	133
8.2.2.2	Déroulement de l'essai	134
8.2.2.3	Paramètres suivis pendant l'essai.....	136
8.2.2.4	Démontage de l'échantillon.....	136
8.2.2.5	Calculs.....	137
8.2.2.6	Suivi de la variation de volume de l'échantillon	140
CHAPITRE 9: AUTRES METHODES EXPERIMENTALES.....		143
9.1.	Propriétés physiques	143
9.1.1.	Distribution de taille des grains	143
9.1.1.1	Analyse granulométrique par tamisage	143
9.1.1.2	Analyse granulométrique par sédimentation.....	143
9.1.1.3	Paramètres de distribution de taille de grain	144
9.1.2.	Capacité d'adsorption du bleu de méthylène	145
9.1.3.	Mesure de la surface spécifique des matériaux.....	146
9.1.3.1	Modèle BET	149
9.1.3.2	Modèle V-t.....	150
9.1.4.	Mesure de la porosité et de la distribution de taille des pores.....	152
9.1.4.1	Mesure de la masse volumique des grains solides	152
9.1.4.2	Porosité et masse volumique apparente sèche.....	152
9.1.5.	Obtention des courbes de distribution de taille des pores par intrusion de mercure ...	154
9.1.6.	Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores	156
9.2.	Caractéristiques minéralogiques et géochimiques.....	157

9.2.1.	Caractérisation minéralogique des faciès de la ZNS.....	157
9.2.1.1	Diffraction des rayons X.....	157
9.2.1.2	Microscopie électronique à balayage (MEB).....	159
9.2.2.	Détermination de la teneur en carbonate	161
9.2.3.	Détermination de la teneur en carbone organique (COT)	162
9.3.	Propriétés hydriques	162
9.3.1.	Mesure de la teneur en eau in situ des échantillons de la ZNS	162
9.3.2.	Angle de contact et tension superficielle de l'eau.....	163
9.3.3.	Détermination des courbes de rétention en eau par la méthode de la presse de Richards.....	164
9.3.4.	Détermination des courbes de rétention en eau à haute gamme de succion (pF 3 – pF 6).....	166
CHAPITRE 10:	ECHANTILLONAGE DE LA ZNS.....	168
10.1.	Travaux de terrain et carottages.....	168
10.1.1.	Localisation du site d'étude.....	168
10.1.2.	Carottage de la ZNS	169
10.2.	Manipulation et préservation des échantillons.....	172
10.3.	Préparation des échantillons pour la mesure des propriétés hydriques.	174
10.3.1.	Sols et roches meubles de la ZNS	175
10.3.2.	Roches calcaires dures.....	176
PARTIE III:	RESULTATS DES ANALYSES ET DES MESURES EXPERIMENTALES.....	178
CHAPITRE 11:	DESCRIPTION DES FACIES DE LA ZONE NON SATUREE A VILLAMBLAIN	179
11.1.	Le sol.....	179
11.2.	Marne calcaire	181
11.3.	Sable marneux.....	182
11.4.	Calcaire dur	184
11.4.1.	Roche saine	184
11.4.2.	Roche fracturée.....	185
11.4.3.	Accumulations dans les fractures.....	187
11.4.4.	Roche fragmentée	188
11.4.5.	Roche altérée	190
11.4.6.	Transformation de la roche au niveau de la zone saturée	192
CHAPITRE 12:	CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX DE LA ZNS....	198
12.1.	Distribution de taille des particules	198
12.1.1.	Granulométrie du sol.....	198
12.1.2.	Granulométrie de la marne calcaire	200
12.1.3.	Granulométrie du faciès sable marneux.....	202
12.1.4.	Synthèse	205
12.2.	Surface spécifique des matériaux.....	207
12.2.1.	Surface spécifique du sol limono-argileux.....	207

12.2.2.	Surface spécifique des marnes.....	210
12.2.3.	Surface spécifique des sables marneux.....	212
12.3.	Résultats des analyses au bleu de méthylène	216
12.4.	Porosité des matériaux.....	217
12.4.1.	Porosité connectée, porosité totale et masses volumiques.....	217
12.5.	Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (roches dures)	222
12.6.	Courbes cumulatives d'intrusion de mercure et de distribution de taille des pores.....	224
12.6.1.	Echantillons de sol.....	224
12.6.2.	Marnes	225
12.6.3.	Sable marneux.....	226
12.6.4.	Synthèse	227
12.7.	Synthèse des propriétés physiques des matériaux de la ZNS.....	229
CHAPITRE 13:	ETUDE MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES MATERIAUX DE LA ZNS	230
13.1.	Teneur en carbonate de calcium.....	230
13.2.	Teneur en carbone organique des matériaux	231
13.3.	Minéralogie des faciès de la ZNS	232
13.3.1.	Sol et roches meubles.....	232
13.3.1.1	Diffractogramme des échantillons en poudre (fraction < 50 µm).....	232
13.3.1.2	Diffractogramme des échantillons sur lames orientées (fraction < 5µm).....	232
13.3.2.	Roche calcaire.....	234
13.3.2.1	Diffractogramme des échantillons en poudre (fraction < 50µm).....	234
13.3.2.2	Diagrammes de diffraction des rayons X sur lames orientées (fraction < 5µm)	236
13.4.	Pétrographie des faciès de roche calcaire.....	239
13.5.	Analyse chimique et microstructure des faciès de roche dure de la ZNS.....	244
13.5.1.	Matrice calcaire.....	244
13.5.2.	Microstructure et topographie structurale	246
13.5.3.	Précipitations et remplacements	250
13.5.4.	Vacuoles	253
13.5.5.	Altération de la matrice.....	254
13.5.6.	Formule chimique des espèces minérales	257
CHAPITRE 14:	PROPRIETES HYDRIQUES DES MATERIAUX DE LA ZNS.....	260
14.1.	Mouillabilité des roches et tension superficielle de la phase liquide.	260
14.1.1.	Angle de contact « eau-roche »	260
14.1.2.	Tension superficielle de la phase mobile.	261
14.1.3.	Calcul du PEA des échantillons de la ZNS.....	262
14.2.	Propriétés hydriques de la pierre poreuse	263
14.2.1.	Essai en condition saturée	263
14.2.2.	Essai en condition non saturée	263
14.3.	Propriétés hydriques de la pâte de billes de verre	265
14.3.1.	Essai en condition saturée	265

14.3.2.	Essai en condition non saturée	266
14.4.	Propriétés hydriques de la céramique à haut point d'entrée d'air	268
14.5.	Tests préalables aux mesures de propriétés hydriques.....	268
14.6.	Essais en condition saturée.....	270
14.7.	Propriétés hydriques des échantillons de sol en conditions non saturées.....	273
14.7.1.	Données brutes mesurées pendant l'essai.....	274
14.7.2.	Données calculées à l'aide de la méthode de Gardner.....	277
14.7.3.	Evolution de la variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés.....	281
14.8.	Propriétés hydriques des échantillons de marne en condition non saturée.....	283
14.8.1.	Données brutes mesurées pendant l'essai.....	283
14.8.2.	Conductivités hydrauliques calculées.....	286
14.8.3.	Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés	287
14.9.	Propriétés hydriques des échantillons de sable en condition non saturée	288
14.9.1.	Données brutes mesurées pendant l'essai.....	288
14.9.2.	Conductivités hydrauliques calculées.....	289
14.9.3.	Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés	291
14.10.	Résultats des propriétés hydriques des échantillons de roche en condition non saturée.....	291
14.10.1.	Données brutes mesurées pendant l'essai	291
14.10.2.	Conductivités hydrauliques calculées	293
14.10.3.	Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés.....	294
14.11.	Courbes de rétention en eau obtenues par la méthode multistep associées aux courbes obtenues à l'aide du potentiomètre WP4C (pF 0 à 6).....	295
14.12.	Courbes de rétention en eau avec la presse de Richards (pF 0 à 4,2).....	298
14.13.	Caractéristiques de rétention en eau des échantillons de la ZNS obtenues à l'aide des trois méthodes de mesure (STx, PR, WP4C).....	301
PARTIE IV:	SYNTHESE DES RESULTATS ET DISCUSSION	304
CHAPITRE 15:	SYNTHESE DES RESULTATS.....	305
15.1.	Propriétés physiques et géochimiques des matériaux	306
15.1.1.	Sol.....	306
15.1.2.	Marne et sable	307
15.1.3.	Roche calcaire.....	308
15.2.	Propriétés hydriques des matériaux.....	309
15.2.1.	Sol.....	309
15.2.2.	Marne et sable	310
15.2.3.	Roche calcaire.....	311
15.3.	Observations au niveau de la transition des faciès meuble et dures.....	312
15.4.	Mesures à l'aide du système triaxial.....	313
CHAPITRE 16:	DISCUSSION ET PERSPECTIVES	315
16.1.	Mesure des propriétés hydriques.....	315
16.2.	Dispositif triaxial.....	317

16.3.	Relation entre les propriétés physiques et les propriétés hydriques des matériaux et implication pour le transport de l'eau vers la nappe	318
16.4.	Estimation du temps de transport de l'eau vers la nappe à travers la ZNS	320
16.5.	Perspectives	325
16.5.1.	Mesure des courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique.....	325
16.5.2.	Expériences de traçage.....	326
16.5.3.	Ajustement de paramètres hydriques et modélisation du temps de transfert à travers l'ensemble de la ZNS.....	327
CONCLUSION GENERALE		329
REFERENCES		333
ANNEXES		339

LISTE DES FIGURES

Figure 1- 1 Concentration moyenne en nitrates dans les nappes phréatiques (l'Agence de l'eau et le BRGM ADES, 2012 d'après Commissariat général au développement durable, 2013)	29
Figure 2- 1 Représentation de la zone critique et du cycle hydrologique (Gaillardet et al., 2018).....	34
Figure 2- 2 Schéma représentatif de la zone non saturée (ZNS).....	36
Figure 3- 1 Arrangement géométrique de grains (Castany, 1998).....	40
Figure 3- 2 Graphique typique d'une courbe de rétention en eau d'un sol (Hopmans et al., 2002). PEA : potentiel matriciel au point d'entrée d'air.....	43
Figure 3- 3 Courbes de rétention en eau de sols de différentes textures (Hall et al. 1977 d'après Smith and Mullins, 2001).....	47
Figure 3- 4 Courbes de rétention de l'eau montrant les deux branches de l'hystérésis lors de la sorption et de la désorption. Le fait que les deux courbes n'arrivent pas au même point sur l'axe des abscisses indique que la réhumectation n'est pas totale (Chossat, 2005).	48
Figure 3- 5 Relation entre le coefficient de résistance, C_f , et le nombre de Reynolds, Re (Chossat, 2005)..	50
Figure 4- 1 Schéma de la presse de (Richards, 1948)	56
Figure 4- 2 Schéma de la méthode des deux plaques d'après Klute et al. (1986) d'après Chossat (2005)..	57
Figure 4- 3 Schéma du montage utilisé pour la méthode de Wind (Frison, 2008).....	57
Figure 4- 4 Schéma du montage utilisé pour la méthode de centrifugation (Caputo and Nimmo, 2005)	59
Figure 4- 5 Résultats des propriétés hydriques pour trois lithotypes de calcarénite mesurés à l'aide de la méthode de centrifugation (QSC). Le lithotype A est caractérisé par une texture de type grainstone* de taille moyenne riche en lithoclastes, le lithotype B est caractérisé par une texture de type packstone* riche en bioclastes de taille moyenne et le lithotype M possède une texture fine de type wackestone* moyennement cimentée (Caputo et Nimmo, 2005). * Ref: Classification de Dunham.....	59
Figure 4- 6 Vue en détail de la cellule et de l'échantillon avec les diverses connections (d'après Chossat, 2005). U_b est la pression au niveau du chapeau drainant appliquée à l'aide d'un contrôleur pression-volume (CPV), U_w est la pression au niveau du piédestal et σ_3 est la pression dans la cellule.....	60
Figure 4- 7 Schéma du montage de la cellule triaxiale (Barbour et al., 1998).....	62
Figure 4- 8 Schéma du système triaxial et ses composants (Barbour et al., 1998).....	63
Figure 4- 9 Variation de l'indice des vides en fonction de la succion matricielle. σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon dans la cellule (Barbour et al., 1998). FWPT: « flexible-wall permeability tests ».....	65
Figure 4- 10 Courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle obtenues à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible (Barbour et al., 1998).....	65
Figure 4- 11 Extracteur à plaque poreuse pour la méthode « one-step outflow » (Chossat 2005, après Gardner, 1962).....	66

Figure 4- 12 Section transversale du montage pour l'application de la méthode « multi-step » (van Dam et al., 1994).	67
Figure 4- 13 Schéma du montage pour l'application de la méthode « multi-step outflow » (Hopmans et al., 2001). U_a est la pression d'injection de l'air ou d'azote, L est la hauteur de l'échantillon, D_e est le diamètre de l'échantillon, U_w est la pression de l'eau dans les pores.....	69
Figure 4- 14 Données brutes de débit d'extraction (à gauche) et données tensiométriques (à droite) après une expérience avec la méthode multistep (Hopmans et al., 2002).	71
Figure 4- 15 a) Mouvement de bulles d'air à travers la céramique quand son potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA) est dépassé; b) Formation d'air à travers la céramique à cause de la cavitation de l'eau dans le système en aval (Fredlund and Rahardjo, 1993).....	71
Figure 4- 16 Translation de pression appliquée à 3 échantillons (Fredlund et Rahardjo, 1993).....	72
Figure 4- 17 Correction des données de débit d'extraction (en vert) à cause de la formation de bulles d'air à la sortie d'une céramique poreuse pendant un essai « multi-step outflow » (Hopmans et al., 2001).	73
Figure 5- 1 a) Carte de l'état d'Idaho et localisation du site d'étude, b) Modèle conceptuel du sous-sol qui présente les zones potentielles d'écoulement dans la zone non saturé à l'est de l'aquifère « Snake River Plain » dans l'Idaho (Perkins et al., 2014).	77
Figure 5- 2 Localisation du site d'étude de Krauthausen et séquence stratigraphique de l'aquifère, centre de recherche Jülich (van der Kruk et al., 2017).....	79
Figure 5- 3 Schéma de l'injection de traceurs (van der Kruk et al., 2017).	80
Figure 5- 4 Contour des concentrations de bromure : a) horizontal, 134 jours après l'injection, b) vertical, 398 jours après l'injection (Vereecken et al., 2000).....	81
Figure 5- 5 Variation de la récupération massique du bromure en fonction du temps (Vereecken et al., 2000).	81
Figure 5- 6 Diagraphies du micromoulinet de forages réalisées au sein de l'aquifère crayeux dans le bassin Artois Picardie (Lacherez-Bastin, 2005)	83
Figure 5- 7 Délimitation des bassins versants en Artois Picarde. En jaune, la localisation des principaux sites de prélèvement de sol (Lacherez-Bastin, 2005).....	84
Figure 5- 8 Concentration en nitrates de la nappe de la craie, calculées en mg/L simulée en a) janvier 1981 et en b) février 1988, au droit du bassin versant de l'Escrebieux. Le cercle noir représente le champ captant de Quiery la Motte, le cercle rouge, le champ d'Esquerchin et le cercle jaune représente le recouvrement des argiles de Louvil.....	85
Figure 5- 9 Situation géographique de la Petite Beauce (Ould Mohamed, 1995).	87
Figure 5- 10 Coupe pédologique d'un sol à Villamblain au lieu-dit les Sapins Dousset. Φ représente la porosité totale (Ould Mohamed, 1992).....	87
Figure 5- 11 Concentration en nitrate dans l'aquifère de Beauce en fonction de la profondeur (Schnebelen, 2000).	90
Figure 6- 1 Limites du système aquifère des Calcaires de Beauce (DIREN Centre, 2000).....	93
Figure 6- 2 Colonne lithostratigraphique du système de Beauce (BRGM, 1995).....	96

Figure 6- 3 Schéma d'organisation des formations géologiques de la Beauce selon une coupe SW-NE (BRGM, 1997). En haut de la figure la coupe géologique laquelle est identifiée par la ligne noire observée dans le bas de la figure.	97
Figure 6- 4 Carte de l'évolution des teneurs en nitrates obtenue par différences des cartes de 1984 et 1981 (Seguin, 1987).	98
Figure 6- 5 a) Epaisseur saturée (m) de l'aquifère des Calcaires de Beauce sur le secteur de Villamblain, b) Coupe géologique NW-SE de l'aquifère des Calcaires de Beauce à Villamblain (Schnebelen, 2000).	100
Figure 6- 6 Log validé du forage FT1-25 dans les alentours du site d'intérêt à Villamblain (InfoTerre, BRGM, 1994).	102
Figure 6- 7 Vue aérienne de la zone d'étude à Villamblain (Google Earth, mai 2016).	102
Figure 7- 1 Schéma général de la cellule du système triaxial non conventionnel et ses accessoires. b. Photo de la cellule triaxiale. CPV : contrôleur pression-volume, ub : contrepression d'eau au niveau du chapeau drainant, uw : pression d'eau dans les pores au niveau de la céramique poreuse, σ_3 : pression d'eau dans la cellule, ua : pression d'air dans les pores.	107
Figure 7- 2 Piédestal avec céramique poreuse HEA.	107
Figure 7- 3 Gamme de céramiques en fonction du PAE (Soilmoisture). La céramique utilisée dans le dispositif de mesure des propriétés hydriques des matériaux de la ZNS est encadrée en rouge.	109
Figure 7- 4 Le système triaxial non conventionnel utilisé pour la mesure des propriétés hydriques des matériaux de la ZNS.	109
Figure 7- 5 Schéma de fonctionnement d'un CPV (GDS Instruments Product, 2015).	111
Figure 7- 6 Clavier à membrane pour le pilotage manuel d'un CPV.	111
Figure 7- 7 Logiciel GDSLab.	112
Figure 7- 8 Montage d'un échantillon dans la cellule triaxiale.	112
Figure 7- 9 Pierre poreuse.	113
Figure 7- 10 Desaérateur Nold série 2100, 8 litres (GEOKON).	114
Figure 7- 11 Déformation de la céramique en présence d'un fort gradient de pression.	115
Figure 7- 12 Préparation de l'échantillon pour la mesure de propriétés hydriques. Du bas vers le haut : piédestal avec céramique poreuse, papier filtre, pâte de silice, échantillon, papier filtre, pierre poreuse et chapeau drainant.	116
Figure 7- 13 Préparation de la membrane à l'aide des accessoires.	116
Figure 7- 14 a) Utilisation de la poire de succion pour coller la membrane au moule, b) Placement du moule avec la membrane autour de l'échantillon.	117
Figure 7- 15 a) Vacuum pour coller la membrane au moule, b) Fixation de la membrane à l'échantillon.	117
Figure 7- 16 a) Cylindre PVC fixé au piédestal de la cellule triaxiale, b) remplissage du cylindre PVC avec des billes de verres.	118
Figure 8- 1 Schéma général d'écoulement dans l'échantillon pour l'essai en saturation.	121
Figure 8- 2 Module de saturation en rampe.	122
Figure 8- 3 Représentation graphique de la rampe de pression pendant l'étape de saturation.	123

Figure 8- 4 Paramètres de pression tangent et sécant.....	124
Figure 8- 5 Représentation graphique de l'évolution de la pression pendant le test de Bw.	126
Figure 8- 6 Impédance hydraulique de la céramique.....	128
Figure 8- 7 Module pour l'essai de Ksat à charge constante (Sols Mesures, 2008, d'après GDS Instruments). Back pressure : U_b , Base pressure : U_w	130
Figure 8- 8 Volume à l'entrée (rouge) et en sortie (bleu) de l'échantillon en régime permanent.....	131
Figure 8- 9 Saturation par capillarité des échantillons de roches calcaires dures.....	132
Figure 8- 10 Schéma du dispositif expérimental.	133
Figure 8- 11 Ensemble de l'échantillon (gauche) et pesage de la pâte à silice après le démontage (droite)	139
Figure 8- 12 Résultat d'un essai drainage d'un sédiment de texture limoneuse (Barbour et al., 1998).	141
Figure 9- 1 Test qualitatif de BM pour la vérification de la concentration de BM. L'unité cc (cm^3 ou mL) représente la concentration en BM et l'unité mn représente les minutes à compter à partir de l'apparition de l'auréole.	146
Figure 9- 2 Classification des sols en fonction du VBS selon la norme NF P94-068.....	146
Figure 9- 3 Classification IUPAC des courbes d'adsorption isothermes (Sing et al., 1985).....	148
Figure 9- 4 Etapes du processus de sorption isotherme en présence de mésopores (Sing et al., 1985).....	149
Figure 9-5 Courbes obtenues à l'aide du modèle V-t pour différents types de matériaux (Quantachrome Instruments, 2012).	151
Figure 9- 6 Protocole expérimental pour la mesure de la porosité efficace des échantillons de roche. a) Saturation préalable à l'aide du système triaxial, b) pesage de l'échantillon, c) mesure du poids de l'échantillon immergé.....	153
Figure 9- 7 Données brutes obtenues pendant les étapes d'injection du mercure dans l'ensemble pénétrömètre-échantillon (Webb, 1993).....	155
Figure 9- 8 Représentation de la distribution de taille de pores en échelle différentielle et en échelle log différentielle (Webb, 1993).....	156
Figure 9-9 Protocole de décarbonatation des échantillons calcaires de la ZNS. a) Acidification et agitation à 70°C, b) échantillons décarbonatés et conditionnés.	158
Figure 9- 10 Echantillons observés au MEB. Lames minces après repérage sous microscope optique et métallisation. Echantillons intacts en haut de la figure.	159
Figure 9- 11 Dispositif DigiDrop (GREMI, UO).	164
Figure 9- 12 a) Saturation des échantillons cylindriques sous vide dans un cristallisateur, b) saturation des mottes avec un bac à sable.....	165
Figure 9- 13 Mise en place des a) échantillons cylindriques et b) mottes dans la presse de Richards avant la fermeture de l'enceinte.....	165
Figure 9- 14 a) Potentiomètre WP4C, b) coupelle en inox adaptée au dispositif.	166
Figure 10- 1 Vue aérienne du lieu-dit « les Hôtels » et localisation des quatre forages.....	169
Figure 10- 2 Machine à forage pour la réalisation des puits sur le site d'étude à Villamblain.....	170
Figure 10- 3 Schémas des carottiers utilisés pour les sondages carottés SC (Stenmans et al., 2009).....	170
Figure 10- 4 Taux de récupération élevé (environ 100 %). SC2. Carottage à sec avec poinçonneur.....	171

Figure 10- 5 Gains transparentes pour le carottage à l'eau avec le carottier triple.	172
Figure 10- 6 Ouverture de carottes pour la description lithologique.	173
Figure 10- 7 Choix des échantillons pour la mesure des propriétés hydriques et la caractérisation des matériaux.....	173
Figure 10- 8 Sous-échantillonnage : a) d'un faciès de calcaire gravier, b) d'un faciès de roche calcaire altérée, c) d'un profil de fracture d'une roche saine.	174
Figure 10- 9 a) Carotte sous gaine de 96 mm de diamètre et 100 cm de hauteur, b) Carotte sans gaine prête pour le prélèvement de l'éprouvette avec la trousse coupante en 70 mm.	175
Figure 10- 10 a) Recarottage avec une trousse coupante à l'aide d'une presse pneumatique, b) Mesures de l'éprouvette.....	175
Figure 10- 11 a) Recarottage avec une couronne diamantée (atelier ANTEA Group). b) Mesure de dimensions de l'éprouvette après prélèvement.....	176
Figure 10- 12 Rectification d'un échantillon de roche à l'aide d'un lapidaire et d'un pied à coulisse.	177
Figure 11- 1 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 2 (SC2) prélevé entre la surface et 1,25 m de profondeur.	180
Figure 11- 2 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 3 (SC3) prélevé entre la surface et 1 m de profondeur.	180
Figure 11- 3 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 1 (SC1) prélevé entre la surface et 0,4 m de profondeur.	180
Figure 11- 4 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 1 (SC1) prélevé entre 0,8 et 1,7 m de profondeur.	181
Figure 11- 5 Carotte 2 (EI-2) du sondage carotté 3 (SC3) prélevé entre 1 et 2 m de profondeur.....	181
Figure 11- 6 Carotte 2 (EI-2) du sondage carotté 2 (SC2) prélevé entre 1,5 m et surface et 2,75 m de profondeur.	182
Figure 11- 7 a) Couche de marne avec texture limoneuse fine (rectangle rouge) observé dans SC 2 entre 6 et 6,6 m de profondeur, b) couche de marne avec texture limoneuse fine (rectangle rouge) observé dans le SC 3 entre 6 et 6,6 m de profondeur.	182
Figure 11- 8 Couche sablo-marneuse (rectangle rouge) du SC1 prélevé entre 4,7m et 5,5 m de profondeur 183	183
Figure 11- 9 Couche sablo-marneuse (rectangle rouge) du SC2 prélevé entre 3,6 m et 4,6 m de profondeur.	183
Figure 11- 10 Couche sableuse (rectangle rouge) du SC3 prélevé entre 4 m et 4,7 m de profondeur.....	183
Figure 11- 11 Carotte 6 (EI-6) du sondage SC1 prélevé entre 5,7 m et 6,1 m de profondeur.....	184
Figure 11- 12 Carotte 5 (EI-5) du SC2 (4,6 à 5,4 m). Faciès de sable grossier (rectangle rouge).....	184
Figure 11- 13 EI-6 du SC3 prélevé entre 5 m et 5,6 m de profondeur. Sable fin (rectangle gauche) et marne (rectangle droit).	184
Figure 11- 14 Roche calcaire saine avec des fractures (12,7-13, 7 m-SC3).....	185
Figure 11- 15 a) EI-6 du SC2 (6 à 7 m), b) transition marne plastique-roche dure imperméable à 6,6 m de profondeur, c) roche fracturée avec précipitation de minéraux secondaires 185	185
Figure 11- 16 Calcaire micritique grisâtre très fracturé avec des vacuoles millimétriques. EI-9 du SC3 (8 à 9 m).	186

Figure 11- 17 EI-11 du SC2 (11 à 12 m). Le rectangle rouge est une zone de macro-fracturation à 11,5 m de profondeur.....	186
Figure 11- 18 a) Zone d'altération et de fracture avec traces d'oxydes (rouge) entre 9,22 et 9,3 m de profondeur b) profil d'oxydation observé à environ 9,3 m de profondeur (SC2).....	186
Figure 11- 19 a) Calcaire micritique grisâtre très fracturé, EI9-SC2 (9 à 10 m), b) zone d'accumulation et d'altération.....	187
Figure 11- 20 EI-10 du SC2 (10 à 11 m). Roche altérée et fracturée.....	188
Figure 11- 21 a) zoom d'une zone de macro-fracturation à 11,5 m de profondeur (SC2), b) dépôts de fines et traces d'oxydation le long d'une fracture à 11,5 m de profondeur (SC2). Ces deux figures sont représentées par le rectangle rouge de la figure 11-24.....	188
Figure 11- 22 a) EI-13 du SC2 (13 à 14 m) et b) zoom de la zone de désagrégation d'une roche calcaire à 13,8 m de profondeur.....	189
Figure 11- 23 a) EI-15 du SC2 (15 à 16 m) et b) graves de granulométrie hétérogène à 15,3 m de profondeur.....	189
Figure 11- 24 Différents états d'altération dans la roche calcaire micritique. EI-4 du SC1 (3,2 à 4,7 m). Roche dure (rectangle rouge).....	190
Figure 11- 25 Différents états d'altération dans la roche calcaire micritique. EI-5 du SC2 (4,6 à 5,4 m).....	190
Figure 11- 26 EI-7 du SC3 (6 à 6,8 m). Roche dure (rectangle rouge).....	190
Figure 11- 27 Altérations observées sur la roche calcaire dure. EI-5 du SC2 (4,6 à 5,4 m).....	191
Figure 11- 28 Chronique piézométrique de Villamblain ajustée à partir de la chronique mesurée à Poiseaux aux données disponibles sur le site d'étude.....	192
Figure 11- 29 EI-19 du SC2 (19 à 20 m). Calcaire beige grisâtre pseudo-brechique concassé.....	192
Figure 11- 30 EI-15 du SC1 (18.1 à 18,9 m). Calcaire blanchâtre avec présence de vacuoles de dissolution.....	193
Figure 11- 31 EI-16 du SC1 (19.2 à 19,8 m). Calcaire blanchâtre fracturé avec zones dissolution et déstructuration.....	193
Figure 11- 32 Coupe lithologique du sondage carotté SC1 au lieu-dit « les Hôtels ».....	195
Figure 11- 33 Coupe lithologique du sondage carotté SC2 au lieu-dit « les Hôtels ».....	196
Figure 11- 34 Coupe lithologique du sondage carotté SC3 au lieu-dit « les Hôtels ».....	197
Figure 12- 1 Prélèvement d'un échantillon de sol (rectangle jaune) pour analyse granulométrique (33 à 40 cm, SC1).....	199
Figure 12- 2 Courbes de distribution en masse (%) de taille des grains d'échantillons de sol brun dans les trois sondages carottés.....	199
Figure 12- 3 Histogramme des tailles de particule en fréquence pondérale pour les échantillons de sol brun dans les trois sondages carottés.....	200
Figure 12- 4 Echantillon de marne calcaire prélevé (rectangle rouge) pour l'analyse granulométrique (1,2 à 1,3 m de profondeur-SC1).....	200
Figure 12-5 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de marne dans les trois sondages carottés.....	201

Figure 12- 6 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de marne dans les trois sondages carottés.	202
Figure 12- 7 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de sable dans les trois sondages carottés.	203
Figure 12- 8 Echantillon de sable marneux prélevé (rectangle rouge) pour l'analyse granulométrique (5,1-5,17m-SC1).	204
Figure 12- 9 Echantillon de sable prélevé (carré rouge) pour l'analyse granulométrique (prof : 4,2-4,25 m-SC3).	204
Figure 12- 10 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de sable dans les trois sondages carottés.	204
Figure 12- 11 Position des échantillons dans le triangle des textures. La fraction sable s'étend de 60 μ m aux graves de plus de 2 mm. En noir les échantillons de sol brun, en rouge les échantillons de marne et en vert les échantillons de sable.	206
Figure 12- 12 Données d'adsorption isotherme pour un échantillon de sol brun (1,4-1,5 m-SC3).	207
Figure 12- 13 Prélèvement d'un échantillon de sol (rectangle jaune) pour un analyse de surface spécifique de grains (1,4-1,5 m-SC3).	207
Figure 12- 14 Droite BET à partir de données d'adsorption isotherme (1,4-1,5 m-SC3).	208
Figure 12- 15 Données d'après le modèle V-t: Vad en fonction de l'épaisseur t de la couche de molécules d'azote (1-1,1 m-SC3).	209
Figure 12- 16 Données d'adsorption isotherme pour un échantillon de marne (2,7-2,8 m-SC2).	210
Figure 12- 17 Prélèvement d'un échantillon de sol (carré rouge) pour l'analyse de surface spécifique de grains (2,7-2,8 m-SC2).	210
Figure 12- 18 Courbe BET à partir de données d'adsorption isotherme (2,7-2,8 m-SC2).	211
Figure 12- 19 Données d'après le modèle V-t: Vad en fonction de l'épaisseur t de la surface de molécules d'azote. (2,7-2,8 m-SC2).	212
Figure 12- 20 Données de deux échantillons de sable calcaire présentant différents processus d'adsorption (a. 2,58-2,6 m-SC3, b. 4,9-5 m-SC1).	213
Figure 12- 21 Courbes BET pour deux échantillons de sable ayant différents types d'adsorption (a. 2,58-2,6 m-SC3, b. 4,9-5 m-SC1).	213
Figure 12- 22 Données d'après le modèle V-t: Vad pour deux échantillons de sable de la ZNS (a : 2,58-2,6 m-SC3, b : 4,9-5 m-SC1).	214
Figure 12- 23 Valeurs de la surface spécifique des échantillons meubles de la ZNS en fonction de la profondeur pour chaque sondage	216
Figure 12- 24 Relation entre l'adsorption de BM et a) la teneur en fraction argileuse, b) la surface spécifique, pour tous les échantillons étudiés.	217
Figure 12- 25 Echantillons représentatifs des faciès de la ZNS.	219
Figure 12- 26 Echantillons représentatifs des faciès de la ZNS.	222
Figure 12- 27 Relations entre vitesse des ondes en compression (V_p), vitesse des ondes en cisaillement (V_s) et la porosité totale de la roche (Φ_T).	223

Figure 12- 28 Données de volume et différentiel de volume en fonction du diamètre de pore équivalent pour un échantillon de sol (30-40 cm-SC1).	225
Figure 12- 29 Données de volume et différentiel de volume d'un échantillon marne (2,65-2,75 m-SC2).	226
Figure 12- 30 Données de volume différentiel et différentiel-logarithmique d'un échantillon marne (prof : 4-4,2 m-SC3).	226
Figure 13- 1 Diffraction des échantillons meubles de la ZNS.	232
Figure 13- 2 Diffraction des échantillons en après décarbonatation en lame orientée (LO).	233
Figure 13- 3 Diffraction des échantillons en poudre de la ZNS.	234
Figure 13- 4 a) Fracture avec précipitation des oxydes à 6,85 m -SC2, b) Fracture à 11,5 m-SC2, c) roche avec des vacuoles et débris grossiers à fins à 14,65 m-SC2.	235
Figure 13- 5 Diffraction de la fraction < 50 µm après décarbonatation.	235
Figure 13- 6 Echantillonnage pour la diffractométrie X sur lame orientée (7,68-7,74 m-SC1).	237
Figure 13- 7 Échantillonnage pour la diffractométrie X sur lame orientée (7,28-7,44 m-SC2).	237
Figure 13- 8 Diffraction des lames orientées après décarbonatation et extraction de la fraction <5 µm.	238
Figure 13- 9 Diffraction des lames orientées avant et après chauffage à 500° C.	239
Figure 13- 10 Matrice calcaire et éléments stratigraphiques présents dans les faciès de roche dure (11-11,1 m-SC2). Analyse en lumière polarisée analysée (LPA).	240
Figure 13- 11 a) Microfissure avec traces d'oxydation (prof: 11 m - SC2) lumière polarisée analysée (LPA), b) profil de fracture avec précipitations d'oxydes (11,64-11,78 m-SC2), c) zone de prélèvement sur la roche fracturée à 11,7 m-SC2.	241
Figure 13- 12 a) Cavités vacuolaires dans la matrice calcaire (prof: 14,5 m - SC2), b) recristallisation et oxydation dans une vacuole de dissolution (prof : 13,25 m - SC2).	242
Figure 13- 13 (suite) : d) Précipitation de minéraux secondaires dans la matrice à partir de foraminifères et radiolaires (prof : 11 m -SC2).	244
Figure 13- 14 a-b) Inclusion d'un cristal de quartz dans la matrice calcaire saine (EDS: électrons en rétrodiffusion), c) cartographie des espèces chimiques présente dans la matrice calcaire saine. (prof. : 11 m -SC2).	245
Figure 13- 15 a) Image en EDS de la matrice calcaire altérée avec la présence de quartz et feldspath potassique, b) cartographie des espèces chimiques présente dans la matrice calcaire altérée (prof. : 11 m -SC2).	246
Figure 13- 16 Topographie d'un échantillon sain observée à l'aide des électrons secondaires. (prof. : 9,75 m -SC2).	247
Figure 13- 17 a) Porosité de la roche calcaire altérée, b) présence de minéraux fibreux dans l'espace poral (prof : 7,7 m -SC2).	248
Figure 13- 18 a) Dépôts de minéraux secondaires, b) grains de calcite couverts par de particules argileuses (prof : 5,15 m -SC2).	249
Figure 13- 19 Profil d'oxydation sur un échantillon intact (prof : 7,7 m -SC2).	250
Figure 13- 20 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) présence des oxydes de fer dans la roche, EDS, c) cartographie des espèces chimiques présentes dans la matrice calcaire altérée (prof.: 11 m -SC2).	251

Figure 13- 21 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie des espèces chimiques présentes sur la fracturation de la roche calcaire. (prof.: 9,3 m –SC2). Ch1 est l'image en arrière générée par défaut par le détecteur EDS.....	252
Figure 13- 22 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie de la distribution de Fe en échelle d'intensité relative, c) cartographie de la distribution de Si-Al dans la matrice calcaire en échelle d'intensité relative (prof: 11,70 m –SC2).....	252
Figure 13- 23 a) Image d'une cavité de dissolution obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie (EDS) de la distribution de Ca-Fe, c) cartographie (EDS) de la distribution de Al - Si - Ca - Fe dans la matrice (prof: 11 m –SC2).....	253
Figure 13- 24 a) Image des cavités de dissolution obtenues sous MEB, b) cartographie (EDS) de la distribution de Fe - Ca (prof: 7,5 m –SC2).....	253
Figure 13- 25 a-b) Remplacement de la calcite par des minéraux argileux (EDS) (prof: 9,3 m–SC2), c) transformation d'un cristal de calcite en palygorskite (prof : 11,7-SC2).....	255
Figure 13- 26 a) Image enregistrée à l'aide du microscope optique. Zone de précipitation de phyllosilicates (encadré jaune), b) grossissement de la zone de précipitations de phyllosilicates à l'aide du détecteur EDS, c) cartographie des espèces chimiques présentes dans l'encadré jaune (prof: 9,3 m –SC2).....	256
Figure 13- 27 a) Remplacement de la calcite par des minéraux argileux autour d'un radiolaire (EDS), b) cartographie d'intensité Mg - Si - Al -d'un microfossile (prof: 11 m –SC2).	256
Figure 13- 28 a) Remplacement de la calcite par des minéraux argileux à proximité d'une microfissure (EDS), b) cartographie Si - Al - Mg d'une microfissure observé dans la matrice calcaire (prof.: 11,70 m –SC2).....	257
Figure 13- 29 Projection de phyllosilicates pour l'analyse de mélanges complexes.....	259
Figure 14- 1 Angle de contact entre une goutte d'une solution aqueuse et la surface d'une roche calcaire saine (a) et altérée (b).	260
Figure 14- 2 Vue de la goutte de solution aqueuse utilisée pour la mesure de tension de surface (grossissement x20)	261
Figure 14- 3 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.....	263
Figure 14- 4 Volume cumulé (rouge) en aval et étapes de succion (bleu) pendant l'essai multistep de la pierre poreuse.....	264
Figure 14- 5 a) Courbe de K(h) et b) θ (h) de la pierre poreuse.....	265
Figure 14- 6 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.....	265
Figure 14- 7 Volume cumulé (rouge) en aval et étapes de succion (bleu) pendant l'essai multi-step de la pâte de billes de verre.....	267
Figure 14- 8 a) Courbes de Log K obtenue avec le STx, b) courbes de θ obtenues à l'aide de la PR et du STx.	267
Figure 14- 9 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.....	268

Figure 14- 10 Représentation des résultats du protocole de saturation préalable aux mesures des propriétés hydriques pour un échantillon de marne (prof: 6,3 m – SC2).....	269
Figure 14- 11 Données de volume enregistrées pendant l'essai de Ksat en régime permanent et un ΔP de 5 KPa.....	270
Figure 14- 12 Fissure observée dans la surface de l'échantillon 7,45-7,55 m-SC2.	272
Figure 14- 13 (a) Profil de densité moyenne et (b) gradient de pression lithostatique moyen de la ZNS à Villamblain.	273
Figure 14- 14 Données brutes enregistrées lors de deux essais de débit d'extraction réalisés sur un échantillon de sol brun et son réplica (intervalle: 40-50 cm-SC1). a) volume cumulé d'eau en sortie de la céramique, b) succion imposée dans l'échantillon.	275
Figure 14- 15 Volume cumulé d'azote dans l'échantillon et d'eau dans la cellule pendant a) l'essai 40-45 cm-SC1 et b) l'essai 45-50 cm-SC1.	276
Figure 14- 16 Courbes semi-log du volume cumulé par étape en fonction du temps. L'échantillon 45-50 cm-SC1 est un réplikat de l'échantillon 40-45 cm-SC1.....	278
Figure 14- 17 Comparaison des échantillons de sols prélevés dans l'intervalle 40-50 cm-SC1 pour observer l'effet des accessoires pendant l'essai multistep.....	280
Figure 14- 18 Propriétés hydriques des échantillons de sols de la ZNS. Les valeurs de Ksat sont représentées par les cercles sans remplissage.....	281
Figure 14- 19 Changement d'indice des vides des échantillons lors de leur désaturation.....	282
Figure 14- 20 Données brutes enregistrées pendant l'essai du débit d'extraction ou Multistep de deux échantillons de marne. a) volume cumulé d'eau en sortie, b) succion matricielle imposée dans l'échantillon.	284
Figure 14- 21 Comparaison d'un échantillon et son réplica pour étudier l'effet de la pierre poreuse (intervalle 1,2-1,28 m-SC2). a) Volume cumulé, b) Succion imposée dans l'échantillon.....	285
Figure 14- 22 Comparaison du volume cumulé pour deux répétition d'un même échantillon pour étudier l'effet de la consolidation sur les propriétés hydriques (intervalle 6,3-6,35 m-SC2). a) Volume cumulé, b) Succion imposée dans l'échantillon.....	286
Figure 14-23 Propriétés hydriques des échantillons de marne de la ZNS. Les valeurs de Ksat sont représentées par les cercles sans remplissage.....	287
Figure 14- 24 Changement de volume des échantillons de marnes pendant la méthode multistep outflow. a) Echantillon 1,2-1,25 m-SC2, b. Echantillon 6,3-6,35 m-SC2^, c) Echantillon 6,3-6,35 m-SC2.	288
Figure 14- 25 Données brutes enregistrées pendant l'essai du débit d'extraction de deux échantillons de sable. a) volume cumulé d'eau en sortie, b) succion matricielle imposée dans l'échantillon.	289
Figure 14- 26 Propriétés hydriques des échantillons de sable de la ZNS. Les valeurs de Ksat sont représentées par les cercles sans remplissage.....	290
Figure 14- 27 Changement de volume d'un échantillon de sable non saturé (intervalle 4-4,2 m-SC3)	291
Figure 14- 28 Données brutes enregistrées pendant l'essai du débit d'extraction de deux échantillons de roche calcaire.....	292

Figure 14- 29 Propriétés hydriques des échantillons de roches de la ZNS. Les valeurs de K_{sat} sont représentées par les cercles sans remplissage.....	294
Figure 14- 30 Changement de volume des échantillons de roches non saturé.....	295
Figure 14- 31 Courbes de θ pour : a) Sol, b) marne, c) sable, d) roche (broyée).....	297
Figure 14- 32 Comparaison des courbes de θ entre la méthode PR et STx pour: a) sol, b) marne, c) sable et d) roche.	299
Figure 14- 33 Comparaison des courbes de θ entre les trois méthodes expérimentales. a) Sol, b) marne, c) sable et d) roche.	302
Figure 16- 1 Schéma du dispositif utilisé pour la détermination de K_{sat} (Carvalho, 1990 d'après Ould-Mohamed, 1995).	316
Figure 16- 2 Coupes lithologiques synthétisées de trois sondages carottés de la ZNS dans le site d'étude.	320
Figure 16- 3 Temps de transport de l'eau à travers la ZNS du site d'étude à Villamblain.	322
Figure 16- 4 Schéma de la ZNS pour les deux sites modélisés (ANTEA Group, 2017).	323
Figure 16- 5 Concentrations simulées à la base de la ZNS pour les quatre configurations testées (ANTEA Group, 2017). Seulement la courbe double porosité-3 couches a été décrite préalablement.	324
Figure 16- 6 Schéma du dispositif expérimental pour les essais de traçage sur colonne (Viel, 2016).	326
Figure 16- 7 a) Courbe de percée d'un sol limono-argileux de Villamblain ajustée à l'équation de convection-dispersion classique, b) ajustement de paramètres hydriques obtenus à l'aide du logiciel STANDMOD.....	327
Figure 16- 8 a) Courbe de volume cumulé obtenue lors de l'essai multistep à l'aide du système triaxial ajustée au modèle de van Genuchten (1980) avec HYDRUS-1D, b) courbe de conductivité hydraulique ajustée au modèle Mualem-van Genuchten avec RETC.....	327

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3- 1 Valeurs de la porosité efficace moyenne pour les principaux aquifères (Castany, 1998).	39
Tableau 3- 2 Caractéristiques de sédiments meubles (Castany, 1998 après USGS). D10 : diamètre nominal d'ouverture de tamis correspondant à 10% de particules traversant, ΦT : porosité totale, Φe : porosité efficace, K : conductivité hydraulique.	39
Tableau 3- 3 Tableau donnant les dénominations du potentiel de l'eau et leurs dimensions selon la façon dont on exprime la quantité d'eau choisie comme référence (Chossat, 2005)	41
Tableau 3- 4 Tableau de synthèse des paramètres du modèle de van Genuchten (1980), avec $m=1-1/n$ et K_s , la conductivité hydraulique à saturation, pour différentes textures des sols selon l'USDA (Carsel et Parrish, 1988 d'après Hopmans et al., 2002).....	45
Tableau 5- 1 Vitesses de migration des nitrates au sein de la ZNS crayeuse du bassin Artois Picarde (Lacherez-Bastin, 2005).	85
Tableau 5- 2 Présentation des quantités d'eau drainées à la basse du limon argileux et de tout le système. T1, T2 et T3 représentent les tubes d'accès à la sonde à neutrons et capa. la méthode capacitive (Ould Mohamed, 1995).	88
Tableau 5- 3 Contribution de la lame d'eau infiltrée à la recharge de la nappe (Ould Mohamed, 1995).....	88
Tableau 6- 1 Valeurs moyennes des transmissivités des formations aquifères de Beauce (Schnebelen, 2000, après Martin et al., 1999).	99
Tableau 7- 1 Précision et résolution des contrôleurs de pression-volume (GDS Instruments Product, 2015)	110
Tableau 8- 1 Paramètre B'w pour différents types de matériaux saturés ou proches de la saturation (Black and Lee, 1973 d'après Fredlund et Rahardjo, 1993).....	125
Tableau 8- 2 Gradient maximal à imposer (Chossat, 2005).	130
Tableau 8- 3 Etapes ou paliers de succion de l'essai non saturé	135
Tableau 9- 1 Classification de taille de pores selon l'IUPAC (Sing et al., 1985)	149
Tableau 9- 2 Classification selon la norme NF P94-048.....	161
Tableau 9- 3 Spécifications techniques du potentiomètre (Meter Environment, 2019).....	167
Tableau 10- 1 Coordonnées géographiques des forages réalisés à Villamblain lieu-dit « les Hôtels » (Source: Géocentre-Axis Conseils, mars 2017).....	168
Tableau 10- 2 Liste des outils utilisés lors du programme de forage dans le site d'étude à Villamblain. φ : diamètre de l'outil.....	170
Tableau 11- 1 Tableau synthèse des principales caractéristiques morphologiques observées dans les matériaux de la ZNS du site d'étude.	194
Tableau 12- 1 Tableau récapitulatif des techniques utilisées pour la détermination des propriétés physiques et géochimiques des matériaux de la ZNS en fonction des variétés 2 types de faciès. GRN : granulométrie et sédimentométrie (§9.1.1), SS : analyse de la surface spécifique (§9.1.3), ps : mesure de la masse volumique de grains (§9.1.4.1), Φ : porosité totale et efficace (§9.1.4.2), DTP : distribution de taille de pores (§9.1.5), VS : vitesse des ondes (§9.1.6), DRX : diffraction de rayons X en poudre et en lame orientée (§9.2.1.1), OPT : analyse d'image avec	

le microscope optique et MEB : géochimie et analyse d'image à l'aide du microscope électronique à balayage (§9.2.1.2).	198
Tableau 12-2 Tableau récapitulatif des données granulométriques.	205
Tableau 12- 3 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains de l'échantillon de sol (1,4-1,5 m-SC3) et les paramètres BET. m est la pente de la courbe, i est l'intersection à l'ordonnée.	208
Tableau 12-4 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains d'un échantillon de sol (1-1,1 m-SC3) et les paramètres du modèle V-t.	209
Tableau 12- 5 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique de grains d'un échantillon de marne et les paramètres BET (2,7-2,8 m-SC2).	211
Tableau 12- 6. Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique de grains d'un échantillon de marne et les paramètres V-t (2,7-2,8 m-SC2).	212
Tableau 12-7 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains des échantillons de sable et paramètres du modèle BET (gauche : 2,58-2,6 m-SC3, droite : 4,9-5 m-SC1).	214
Tableau 12- 8 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains des échantillons de sable et paramètres du modèle V-t (gauche : 2,58-2,6 m-SC3, droite : 4,9-5 m-SC1).	214
Tableau 12- 9 Récapitulatif des données de surface spécifique de grains pour les échantillons meubles de la ZNS.	215
Tableau 12- 10 Résultats des analyses d'adsorption de BM selon la norme NF P 94-068.	216
Tableau 12- 11 Données de porosité connectée des échantillons de la ZNS. ρ_b :masse volumique apparente, Φ_e : porosité efficace, Φ_T : porosité totale et Φ_{nc} : porosité non connectée. Les données en rouge ne sont pas cohérentes.	218
Tableau 12- 12 Données de masses volumiques des particules. (*) valeur obtenue de la littérature.	221
Tableau 12- 13 Valeurs mesurées des vitesses propagation des ondes pour des échantillons de roche.	223
Tableau 12- 14 Récapitulatifs de la distribution de taille de pores et d'intrusion totale de mercure.	228
Tableau 12- 15 Récapitulatifs des propriétés physiques des matériaux de la ZNS. GRM : granulometrie, SS : surface spécifique de grains, VBM : valeurs d'adsorption de bleu de méthylène, Φ_e : porosité efficace, Φ_T : porosité totale, ρ_s : masse volumique de particules solides, V_p : vitesse de propagation des ondes, DTP : distribution de taille de pores.	229
Tableau 13- 1 Tableau récapitulatif des mesures de teneur en carbonates.	230
Tableau 13-2 Résultats de teneur en carbone organique (TOC) mesurée à l'aide du dispositif RockEval.	231
Tableau 13- 3 Analyse chimique exprimée en oxydes sur les zones d'altération de la matrice calcaire (prof : 11-11,1 m -SC2).	245
Tableau 13- 4 Analyse chimique sous forme d'oxydes sur les endroits de précipitation dans la matrice calcaire (prof : 11 m -SC2).	254
Tableau 13- 5 Analyse chimique en oxydes sur les zones d'altération de la matrice calcaire (prof : 11,7 m -SC2).	255

Tableau 13- 6 Synthèse des formules chimiques calculées pour les minéraux trouvés dans la roche calcaire à partir des analyses EDS.	257
Tableau 14- 1 Angle de contact moyen mesuré sur une surface de roche calcaire saine de la ZNS.	261
Tableau 14- 2 Angle de contact moyen mesuré sur une surface de roche calcaire altérée de la ZNS.	261
Tableau 14- 3 Mesures de la tension de surface de la phase mobile.	262
Tableau 14- 4 Estimation du PEA des échantillons pour les essais d'extraction multistep. PEA : potentiel matriciel au point d'entrée d'air. Φ_{macro} -moy est la taille de macropores. Elle est calculée à partir des courbes de distribution de taille de pores.	262
Tableau 14- 5 Synthèse de la mesure du Ksat de la pâte de billes de verre. De est le diamètre nominal de l'échantillon, L est la hauteur de l'échantillon, ρ_b est la masse volumique apparente, ΔP est la charge hydraulique imposée dans l'échantillon, Q est le débit en régime permanent, Ksat est la conductivité hydraulique à saturation, Re est le numéro de Reynolds, t est la durée de temps de l'essai, ET est l'écart type standard et CV est le coefficient de variation de la mesure de Ksat.	266
Tableau 14- 6 Synthèse de mesures à la fin de l'essai en condition non saturée. Me-f est la masse de l'échantillon humide à la fin de l'essai multistep, Md est la masse de l'échantillon séché à l'étuve, Mret est la masse d'eau résiduelle dans l'échantillon à la fin de l'essai multistep, MwT est la masse totale d'eau stockée dans l'échantillon saturé, ΣV_{wi} est le volume d'eau drainé par l'échantillon à la fin de l'essai.	266
Tableau 14- 7 Résultats des mesures de la conductivité hydraulique à saturation.	271
Tableau 14- 8 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de sol brun.	274
Tableau 14- 9 Synthèse de résultats après le traitement des données à l'aide des équations de Gardner (intervalle 40 cm–50 cm-SC1). ΣV_{w-i} est le volume cumulé obtenu pour l'étape i, h_i est la succion dans les pores imposée durant l'étape i, θ_i est la teneur en eau à la fin de l'étape i, Σt_i est le temps cumulé à la fin de l'étape i, T est la température d'essai dans la salle, Δt est l'intervalle de temps dans l'étape i choisi pour faire les calculs de la pente B, B est la pente de la courbe calculée avec la méthode de Gardner, $K_{20^\circ C}$ est la conductivité hydraulique corrigée de l'effet de la température.	279
Tableau 14- 10 Synthèse de résultats de la variation de volume des échantillons de sol de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai, e_f est l'indice de vides à la fin de l'essai, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initial, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai.	282
Tableau 14- 11 Conditions expérimentales des essais de débit d'extraction pour les échantillons de marne.	283
Tableau 14- 12 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de sable.	288
Tableau 14- 13 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de roches.	291
Tableau 14- 14 Valeurs de teneurs en eau pour pF 4,2 et pF 6 calculées pour l'essai avec le WP4C.	296

Tableau 16- 1 Coupes lithologiques synthétisées de trois sondages carottés de la ZNS dans le site d'étude.	
θ_{terr} : teneur en eau de l'échantillon juste après le prélèvement au terrain selon la norme NF	
P 94-050. *Données pas disponibles. La valeur de $*K(\theta)$ est considérée égale à K_{sat} pour le	
faciès de roche.....	321

LISTE DES ANNEXES

Annexe 8-1 Schéma du protocole de saturation et de la mesure de K_{sat} avec le système triaxial.....	338
Annexe 8- 2 Module « B-check ». Contrôle de B et critères de l'essai.....	339
Annexe 8- 3 Module de consolidation et critères de l'essai (GDS Lab Handbook).....	340
Annexe 9- 1 Exemple de calcul de demi-formule unité d'un phyllosilicate de type 2 :1 : bases de calcul « non déshydratées » :12 ; « déshydratées » :11 (Meunier, 2013).	341
Annexe 10-1 Données obtenues lors de l'essai pressiométrique.....	342
Annexe 10- 2 Diagraphies du sondage carotté SC1.	343
Annexe 11- 1 : Photos des carottes.....	344
Annexe 12- 2 : Courbes de sorption isothermique	357
Annexe 12- 3 : Courbes de distribution de taille de pores	367
Annexe 14- 1 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de marne de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai multistep, e_f est l'indice de vides à la fin de l'essai multistep, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initiale, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai multistep.....	372
Annexe 14- 2 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de sable de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai multistep, e_f est l'indice de vides à la fin de l'essai multistep, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initiale, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai multistep.....	372
Annexe 14- 3 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de roche de la ZNS.	372

LISTE DES SYMBOLES

<i>Symboles latins</i>	Définition	Unités
A	Surface de la section d'un échantillon	cm ²
A'	valeur constante négative dans la loi de Laplace	m ²
A_{cs}	surface transversale d'un arrangement hexagonal de la couche mono-moléculaire d'azote	m ²
B_a	paramètre de variation de pression de pores pour la phase gazeuse	cm/cm
B_b	masse de BM introduite dans la solution	g
B_w	paramètre de Skempton	cm/cm
C	capacité capillaire	cm ⁻¹
C_c	coefficient de courbure (paramètre issu de la granulométrie)	-
C_f	coefficient de résistance d'un matériau à l'écoulement de fluides	-
C_u	facteur d'uniformité (paramètre issu de la granulométrie)	-
D	diffusivité hydraulique	cm ² /s
D_e	diamètre de l'échantillon	cm
D_k	diamètre équivalent des particules d'après la loi de Stokes	μm
D_N	dimension nominal d'ouverture pour un pourcentage massique N	μm
D_p	diamètre moyen des pores	cm
e	indice de vides	cm ³ /cm ³
g	accélération de la pesanteur	m/s ²
G_s	poids spécifique d'un matériau	-
H	potentiel total de l'eau exprimé en unité de charge hydraulique	cm
h_m, h	potentiel matriciel	cm
H_t	profondeur effective du centre de poussée du densimètre à un instant de temps	cm
K	conductivité hydraulique	cm/j
k	perméabilité intrinsèque du matériau	cm ²
K_c	conductivité hydraulique de la céramique à l'état de saturation	cm/j
K_{sat}	conductivité hydraulique à l'état de saturation	cm/j
L	longueur d'un échantillon	cm
l	connectivité dans les pores d'après le modèle de Mualem	-
m, n	coefficients empiriques du modèle de van Genuchten	-
M_d	masse de l'échantillon sec après séchage	g
M_{ex}	masse d'eau cumulée sortie de l'échantillon pendant un essai multistep	g
M_{ex-cor}	masse d'eau cumulée sortie de l'échantillon corrigée	g
M_{f-ex}	contribution massique en eau du papier filtre	g
M_m	masse molaire d'une espèce ou élément chimique	g/mol
M_{p-ex}	contribution massique en eau de la pierre poreuse	g
M_{p-f}	masse totale de la pierre humide à la fin de l'essai	g
M_{p-sat}	masse totale de la pierre saturée	g
M_{ret}	masse d'eau restant dans l'échantillon à la fin d'un essai multistep	g
M_{si-d}	masse de billes de verre après séchage	g
M_{si-ex}	contribution massique en eau de la pâte des billes de verre	g
M_{si-f}	masse de la pâte des billes de verre à la fin de l'essai transitoire	g
M_{wT}	masse totale d'eau stockée par l'échantillon à saturation	g
N	numéro d'Avogadro	m ⁻¹
Nb_{cat}	nombre des cations ayant comme base de calcul une quantité d'atomes d'oxygène	-
Nb_{m-cat}	nombre de monocations par rapport au %Ox mesuré	-
Nb_o	nombre d'oxygènes associé à chaque cation,	-
P/P_0	pression relative de vapeur en équilibre	-
P_a	pression de l'air dans les pores	KPa
P_c	pression capillaire	
pF	unité de potentiel en échelle log	-
P_w	pression de l'eau dans les pores	KPa
Q	débit d'eau	cm ³
q	densité de flux volumique	cm/j
r	rayon de pore	μm
R	constante universelle des gaz parfaits	J.K ⁻¹ .mol ⁻¹
Re	nombre de Reynolds	-
r_e	rayon de l'échantillon	cm
s	succion d'un matériau non saturé	cm
S_{BET}	surface spécifique totale calculée à l'aide de la méthode BET	m ² /g
S_e	saturation effective du matériau	cm ³ /cm ³
S_{MP}	surface spécifique de micropores calculée à l'aide de la méthode V-t	m ² /g
S_t	surface spécifique externe calculée à l'aide de la méthode V-t	m ² /g
t	temps	s, h, j

t_A	l'épaisseur de la première couche d'azote adsorbée	Å
T_b	température de la salle d'essai issue de l'analyse de teneur en carbonates	°C
t_p	durée de propagation de l'onde de compression	s
t_s	durée de propagation de l'onde de cisaillement	s
U'_w	pression de l'eau dans les pores corrigée par l'effet d'impédance de la céramique	KPa
U_a	pression d'injection de l'air dans les pores	KPa
U_b	pression de l'eau dans le haut de l'échantillon	KPa
U_w	pression de l'eau à la base de l'échantillon	KPa
V	vitesse d'un fluide	cm/s
V_{ad}	volume d'azote adsorbé par la surface d'un échantillon lors des analyses BET	cm ³ /g
V_b	volume de la solution de bleu utilisé	cm ³
VBS	valeur de bleu de méthylène absorbé par gramme d'échantillon	g/100g
V_c	volume d'eau injecté dans la cellule	cm ³
V_m	volume de la première couche d'azote adsorbé par gramme d'échantillon	cm ³ /g
V_{MP}	volume de micropores	cm ³
V_p	vitesse de propagation de l'onde de compression	m/s
V_s	vitesse de propagation de l'onde de cisaillement	m/s
V_T	volume total d'un échantillon	cm ³
V_v	volume de pores	cm ³
V_w	volume d'eau cumulé à la sortie de l'échantillon.	cm ³
w	teneur en eau massique	g/g
W_m	masse de la première couche d'azote adsorbée par la phase solide	g/g
z	potentiel gravitaire, altitude	cm
$\#O$	nombre d'oxygène associé au monocation constituant l'oxyde correspondant	-
$\% O_x$	pourcentage d'oxyde mesuré par le détecteur EDS	-

Symboles grecs	Définition	Unités
α	paramètre du modèle van Genuchten inversement proportionnel au point d'inflexion de $\theta(h)$	-
α_G	paramètre qui est fonction de la hauteur L de l'échantillon d'après les équations de Gardner	cm ⁻¹
γ	angle de contact entre l'interface liquide-gaz et liquide-solide	-
ε	nombre de papiers filtres placés dans l'ensemble du dispositif	-
θ	teneur en eau volumique	cm ³ /cm ³
θ_{15}	teneur en eau à pF 4,2	cm ³ /cm ³
θ_{air}	teneur en eau d'un échantillon séché à l'air à 20°C et 1 atm	cm ³ /cm ³
θ_r	teneur en eau volumique résiduelle	cm ³ /cm ³
θ_s	teneur en eau volumique à saturation	cm ³ /cm ³
μ	viscosité dynamique d'un fluide	KPa.s
ρ_b	masse volumique apparente	g/cm ³
ρ_s	masse volumique de la phase solide	g/cm ³
ρ_w	masse volumique de l'eau à 20 °C et pression atmosphérique	g/cm ³
σ	tension superficielle du liquide	N/m
σ_3	pression dans la cellule	KPa
σ_c	contrainte effective de consolidation	KPa
Φ_e	porosité efficace	
Φ_T	porosité totale	cm ³ /cm ³
Ψ	potentiel	hPa
ω	vitesse angulaire	tpm

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Les eaux souterraines, au niveau des principales zones d'agriculture intensive en France, ont subi une forte augmentation de leur concentration en nitrates et en pesticides pendant les dernières décennies. C'est le cas pour l'aquifère des Calcaires de Beauce, situé en Région Centre-Val de Loire, lequel est touché par la pollution par les engrais azotés (fig. 1-1). La nappe phréatique de l'aquifère est essentiellement réalimentée par le drainage hivernal. Les suivis effectués depuis une vingtaine d'années indiquent une augmentation régulière de la teneur en nitrates (Schnebelen, 2000). Si cette situation persiste dans le temps, la ressource peut se trouver menacée dans les prochaines années.

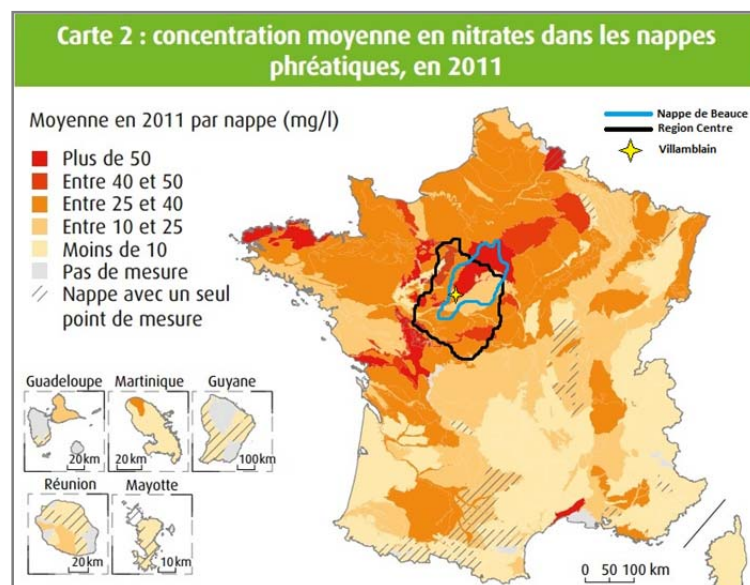


Figure 1- 1 Concentration moyenne en nitrates dans les nappes phréatiques (Agence de l'eau et le BRGM ADES, 2012 d'après le Commissariat général au développement durable, 2013)

L'aquifère des Calcaires de Beauce a été étudié au cours des dernières décennies. Cependant, la plupart des études ont concerné les tous premiers mètres de la zone non saturée (ZNS) (0 à 3 mètres) ou la zone saturée de l'aquifère. Les processus d'écoulements à travers la ZNS ne sont pas bien compris. Plusieurs auteurs (Ould Mohamed, 1995 ; Schnebelen, 2000) ont souligné son hétérogénéité, aussi bien latérale que verticale, avec des lithologies assez variables. L'accès à l'ensemble de la ZNS reste un enjeu majeur, dont les principales difficultés sont techniques et économiques. La ZNS de la Beauce peut s'étendre de 20 m d'épaisseur jusqu'à une centaine de mètres au centre du bassin (par exemple, ~ 120 m à la Ferté-Saint-Aubin).

1.1. Objectif de l'étude

L'objectif général du travail de recherche présenté dans ce document est de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de transport au sein de la zone non saturée des calcaires aquitaniens de l'aquifère de Beauce, depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur d'une vingtaine de mètres. Le caractère innovant de ce travail de recherche réside dans la caractérisation de l'ensemble des matériaux de la ZNS, qui sera réalisée au laboratoire à partir de carottages.

La zone agricole de Villamblain a fait l'objet de plusieurs études préalables. Aujourd'hui, cette zone fait l'objet d'un programme de recherche interdisciplinaire afin de gérer efficacement la pollution diffuse par les nitrates dans l'aquifère des Calcaires de Beauce 5 (§1.1). Les partenaires impliqués sont l'Université d'Orléans, l'INRA, le BRGM, le CNRS et ANTEA Group. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet régional ESPOL (Estimation du transport préférentiel des polluants (nitrates) dans les sols et la zone non saturée) et contribuera au développement de la plateforme O-ZNS (Observatoire de la zone non saturée) du projet CPER PIVOTS. Ces deux projets ont pour objectif d'approfondir la compréhension de la zone non saturée des Calcaires de Beauce. O-ZNS consiste en la mise en place d'un puits d'accès large (diamètre ~ 3-4 m) et suffisamment profond (~ 20 m) pour permettre l'instrumentation de l'ensemble de la zone non saturée jusqu'à la nappe de Beauce, à l'aide de différents capteurs et échantillonneurs et sans perturbation des conditions aux limites du système. L'objectif est de suivre *in situ* et sur le long terme les processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent au sein de la zone non saturée

1.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif énoncé, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants:

1. Mise en œuvre d'une campagne d'échantillonnage de la ZNS en vue de sa description et de sa caractérisation. L'échantillonnage représente une étape clé. La complexité de la zone pose des difficultés du point de vue de l'intégrité et de la préservation des sédiments prélevés.

2. Conception d'un dispositif expérimental pour la mesure des propriétés hydriques en laboratoire, adapté aux caractéristiques des matériaux constitutifs de la ZNS de l'aquifère des Calcaires de Beauce.

3. Etablir des protocoles expérimentaux adaptés à chaque faciès sédimentaire de la ZNS, pour l'obtention des propriétés hydriques et physicochimiques des matériaux.

4. Mesurer les propriétés hydriques telles que les courbes de conductivité hydraulique et de rétention en eau des matériaux de la ZNS.

Les objectifs précédents vont permettre de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la séquence stratigraphique de la ZNS au site d'étude ?
- Quel est le rôle de chaque couche stratigraphique dans les phénomènes de transport et de stockage des eaux de la surface jusqu'à la nappe ?
- Existent-ils des phénomènes de transport préférentiel à travers certains types de matériaux ?
- Quelles sont les valeurs de conductivité hydraulique des matériaux qui composent la ZNS pour différentes valeurs de teneur en eau ?
- Quelle est la capacité de rétention en eau des couches sédimentaires de la ZNS pour différents états hydriques ?
- Comment les propriétés physiques et chimiques jouent sur les propriétés hydriques des matériaux ?

Apporter des réponses à ces questions permettra une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique de la ZNS et de ses conséquences sur la qualité des eaux souterraines en Beauce. La conception d'un dispositif expérimental est un aspect clé pour répondre à tous les objectifs annoncés précédemment

1.3. Structure de la thèse

La première partie de cette étude est destinée à rappeler les concepts de base pour la compréhension du travail scientifique présenté, ainsi que les travaux précédents réalisés sur le sujet d'étude.

La deuxième partie présente le contexte de la région de la Beauce en partant de l'échelle régionale vers l'échelle locale. Il s'agit par la suite de décrire la méthodologie utilisée pour accomplir les objectifs spécifiques établis. Nous décrirons les aspects techniques pour la conception d'un dispositif expérimental de mesure des propriétés hydriques, ainsi que les démarches scientifiques suivies sur le terrain et dans le laboratoire.

La troisième partie est consacrée à la présentation de l'ensemble des résultats. Une description lithologique détaillée de l'ensemble de la ZNS est présentée au début. Ensuite, on présente les résultats obtenus au laboratoire pour toutes les propriétés physiques et géochimiques des matériaux de la ZNS. A la fin du chapitre, nous présentons les résultats des propriétés hydriques des couches sédimentaires de la ZNS obtenus par différents méthodes.

Une dernière partie chapitre est dédiée à la synthèse des résultats ainsi qu'à une discussion des observations et résultats obtenus. A la fin de ce dernier chapitre, on présente les perspectives de ce travail pour approfondir le sujet de recherche.

PARTIE I:

**CADRE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE
ET ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES**

CHAPITRE 2: LA ZONE NON SATUREE

2.1. Le cycle hydrologique

Les ressources en eau font partie essentielle du développement humain et du fonctionnement de la biosphère. Dans certains endroits, ces ressources sont dégradées et parfois menacées par l'activité industrielle humaine. Pour lutter contre cette dégradation, il faut connaître comment l'eau circule au sein du système Terre, c'est-à-dire, connaître le cycle de l'eau (fig. 2-1).

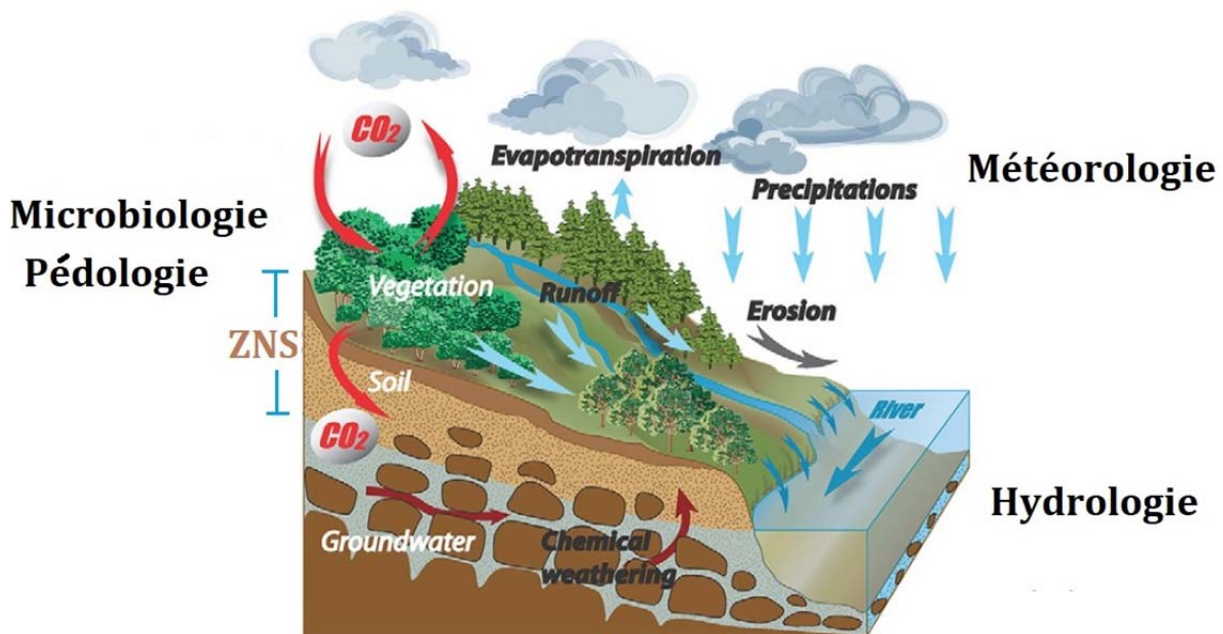


Figure 2- 1 Représentation de la zone critique et du cycle hydrologique (Gaillardet et al., 2018)

L'eau qui se trouve sous forme liquide dans les réservoirs naturels (rivières, lacs, océans) ou sous forme de gaz (nuages) dans l'atmosphère peut être soumise à une pollution par différents agents chimiques qui sont émis dans l'atmosphère (dioxines, pesticides, hydrocarbures gazeux) ou versés dans les sols (nitrates, métaux, hydrocarbures liquides). Les **précipitations**, notamment en forme de pluie, conduisent l'eau déjà polluée vers les cours d'eau via les **ruissellements** superficiels. Une fois dans le sol, l'eau **percole** à travers la **zone non saturée** (sol et sous-sol) pour ensuite se **stocker et circuler** dans une **nappe phréatique**. Dans ce parcours jusqu'à la nappe, l'eau croise différents éléments d'origine humaine ou naturelle présents dans le milieu poreux, et sa composition chimique va évoluer. Les molécules chimiques d'origine humaine présentes dans l'eau souterraine témoignent des activités humaines. L'eau

contaminée déjà stockée dans l'aquifère sortira de façon naturelle par des sources ou l'homme viendra la prendre en creusant un puits ou un forage.

2.2. La zone critique

A partir du cycle hydrologique, on peut délimiter une zone entre l'atmosphère et le sous-sol, qui est une zone d'échanges intenses d'énergie et de matière, ainsi que le lieu d'hébergement des écosystèmes terrestres et des sociétés humaines. Cette zone est appelée « zone critique ». Celle-ci intervient directement dans les phénomènes d'évapotranspiration et de transpiration, de partage, d'infiltration/ruissellement, de percolation et de stockage d'eau.

La zone critique représente la fine couche de la surface des continents qui se trouve entre la canopée végétale (interface végétation-atmosphère) et la partie inférieure de la zone d'altération du sous-sol (interface roche altérée-roche intacte). Cette zone inclut la biosphère proche et la lithosphère peu profonde (Guo et Lin, 2016). Le concept de zone critique permet de rassembler de plusieurs phénomènes tels que les interactions abiotiques-biotiques à la surface des continents, ainsi que l'intégration des échelles de temps et d'espace liées aux flux de masse et d'énergie dans les écosystèmes terrestres (Guo et Lin, 2016).

Le terme « critique » souligne deux notions. La première est le caractère critique de l'une des principales interfaces de la planète, la limite lithosphère-atmosphère. C'est la couche qui a permis le développement de la vie à la surface des continents, où les nutriments sont libérés par les roches et sur laquelle les écosystèmes s'appuient. La deuxième notion a une implication environnementale étant donné qu'elle a besoin d'être préservée par l'être humain. C'est l'endroit où les civilisations se sont développées, la source de nourriture et d'eau, mais aussi la zone où on libère la plupart de nos déchets (Guo and Lin, 2016). La zone critique est systématiquement soumise à des stress de différentes natures et donc pourrait se transformer dans un système complètement perturbé (Gaillardet et al., 2018). D'où l'importance d'étudier cette zone.

2.3. La zone non saturée

Faisant partie de la zone critique, la ZNS est le lieu du transport de l'eau et de polluants vers les eaux souterraines. En comprenant son fonctionnement, on peut prévoir les transferts et mettre en œuvre des pratiques adaptées pour protéger ces ressources en eau et l'environnement.

Dans un système hydrogéologique, la couche la plus superficielle de la Terre correspond à un système tri-phasique, composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (fig. 2-2).

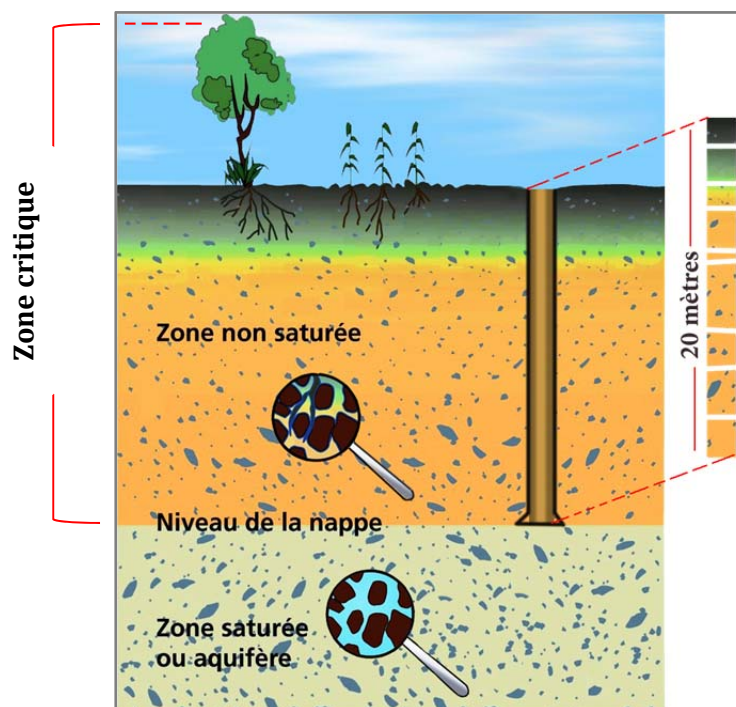


Figure 2- 2 Schéma représentatif de la zone non saturée (ZNS).

La phase solide est composée de minéraux et de matière organique. La phase liquide est essentiellement aqueuse avec une quantité variable de substances dissoutes. Enfin, la phase gazeuse a une composition proche de celle de l'atmosphère, mais avec une concentration généralement plus élevée en vapeur d'eau et en CO_2 . La couche de surface des continents ayant les trois phases est nommée « Zone Non Saturée » (Tindall and Kunkel, 1999). La partie superficielle de la ZNS est en contact direct avec l'atmosphère et correspond au sol. La végétation ne fait pas partie de cette zone mais elle y puise directement ses nutriments. Sur la figure 2-2, on observe que la ZNS fait partie de la zone critique, entre la surface du sol et la surface de la nappe.

La ZNS est un milieu important pour les échanges de matière et d'énergie. Elle joue un rôle clé dans le processus de recharge de la nappe et aussi dans le transport de substances chimiques de la surface du sol jusqu'à la nappe. Elle détermine la vulnérabilité des réservoirs d'eau situés en dessous.

CHAPITRE 3: FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE LA ZONE NON

SATUREE. APPROCHE THEORIQUE

Il y a deux propriétés intrinsèques des matériaux de la ZNS qui contrôlent le stockage et le transfert de l'eau : la rétention en eau et la conductivité hydraulique. Ces deux propriétés sont fortement dépendantes de la porosité du matériau et de ses caractéristiques.

3.1. Porosité et distribution de taille des pores

3.1.1. Définitions et ordres de grandeur

La porosité totale, Φ_T , est définie comme le rapport du volume de pores (V_v) sur le volume total d'un échantillon (V_T) :

$$\Phi_T = \frac{V_v}{V_T} \quad \dots (3-1)$$

Elle est reliée à la masse volumique apparente du matériau (ρ_b) et à la masse volumique de la phase solide (ρ_s), elle-même dépendante de la nature minéralogique de l'échantillon. La relation entre ces trois propriétés s'exprime :

$$\Phi_T = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \dots (3-2)$$

On considère trois types de porosité. La porosité non connectée, qui correspond aux pores isolés, aux vacuoles, souvent trouvées dans les roches volcaniques à cause du gaz piégé dans la roche solidifiée, la porosité connectée, dans laquelle les pores sont interconnectés et la porosité efficace (intrinsèque à la porosité connectée), qui exprime la proportion d'eau gravitaire que un matériau peu libérer sous l'effet de drainage complet. La porosité connectée est calculée avec l'équation 3-1 si l'on considère que V_v est constitué uniquement de pores totalement connectés. Pour le calcul de la porosité totale (y compris les pores non connectés), il faut utiliser l'équation 3-2 étant donné la difficulté pour calculer V_v . Dans les sols et sédiments, la totalité de pores sont interconnectés, mais dans une roche, il peut y avoir des vides isolés qui ne participent pas à la porosité connectée.

Les tableaux 3-1 et 3-2 présentent des valeurs de porosité efficace issues de la littérature.

Tableau 3- 1 Valeurs de la porosité efficace moyenne pour les principaux matériaux aquifères (Castany, 1998).

Types de réservoirs	Porosité efficace %	Types de réservoirs	Porosité efficace %
Gravier gros	30	Sable gros + silt	5
Gravier moyen	25	Silt	2
Gravier fin	20	Vases	0,1
Gravier + sable	15 à 25	Calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	Craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0,1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	Schistes	0,1 à 2

3.1.2. Les facteurs de la porosité efficace

La porosité efficace est reliée aux caractéristiques physiques du matériau par:

- le diamètre caractéristique des grains (D_{10}). La porosité efficace Φ_e diminue avec la taille des grains (tab. 3-2). Cette grandeur représente la dimension nominale d'ouverture du tamis à maille carrée pour laquelle le pourcentage massique de tamisât est égal à 10 %. C'est un paramètre géotechnique obtenu à partir de la courbe de distribution de taille des grains.

Tableau 3- 2 Caractéristiques de sédiments meubles (Castany, 1998 d'après USGS). D_{10} : diamètre nominal d'ouverture de tamis correspondant à 10% de particules traversant, Φ_T : porosité totale, Φ_e : porosité efficace, K : conductivité hydraulique.

Types de sédiments	D_{10} (mm)	Φ_T (%)	Φ_e (%)	K (m/s)
Gravier moyen	2,5	45	40	3.10^{-1}
Sable gros	0,25	38	34	1.20^{-3}
Sable moyen	0,125	40	30	6.10^{-4}
Sable fin	0,09	40	28	7.10^{-4}
Sable très fin	0,045	40	24	1.20^{-5}
Sable silteux	0,005	32	5	1.10^{-9}
Silt	0,003	36	3	3.10^{-8}
Silt argileux	0,001	38	-	1.10^{-9}
Argile	0,0002	47	-	5.10^{-10}

- l'arrangement des grains (fig. 3-1). Il influence fortement la porosité. Celle-ci décroît de 47,6 % pour l'arrangement cubique, le plus lâche, à 25,9 % pour l'arrangement rhomboédrique le plus tassé. On observe généralement une diminution de la porosité avec la profondeur (Castany, 1998).

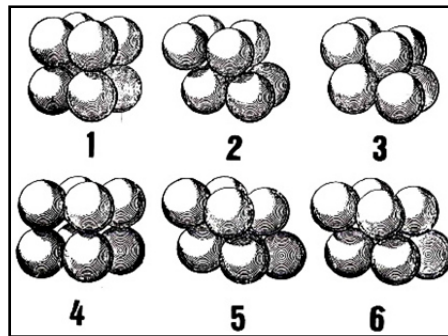


Figure 3- 1 Arrangement géométrique de grains (Castany, 1998).

- la surface spécifique des grains : il s'agit du rapport entre la surface développée par les grains d'un matériau et sa masse. Cette propriété est un indicateur de la présence de particules de petite taille, qui peuvent être très réactives vis-à-vis de phase liquide et qui vont contribuer à diminuer la porosité efficace et la perméabilité du matériau (tab. 3-2).

3.2. Potentiel de l'eau et capillarité

Il y a trois forces permettant à l'eau d'être retenue par la phase solide des matériaux de la ZNS :

- les forces d'adsorption, agissant à courte distance, généralement dues à des interactions de type London-van der Waals,
- les liaisons de capillarité dues aux forces d'adhésion et de cohésion,
- l'effet osmotique dû aux cations contenus dans l'eau du sol.

L'énergie potentielle de l'eau en conditions non saturées diminue par rapport à l'eau libre et varie en fonction de la position dans les champs de potentiel représentatifs de ces forces (Dirksen, 1999). L'énergie potentielle a les dimensions d'un travail. Elle correspond au fait qu'on doit produire un travail pour déplacer l'eau dans un champ de forces. Etant donné que l'énergie cinétique de l'eau qui circule dans la ZNS est négligeable, l'état d'énergie de l'eau dans les matériaux de la ZNS est donc établi en fonction de son énergie potentielle. Cette énergie potentielle peut prendre diverses appellations suivant la façon dont la quantité d'eau est exprimée. Celle-ci peut être exprimée en masse, volume ou poids (tab.3-3).

Tableau 3- 3 Tableau donnant les dénominations du potentiel de l'eau et leurs dimensions selon la façon dont on exprime la quantité d'eau choisie comme référence (Chossat, 2005)

Quantité	Dimension	Dénomination	Symbole
Masse	L^2T^{-2}	Potentiel chimique	μ
Volume	$ML^{-1}T^{-2}$	Potentiel de pression	Ψ
Poids	L	Potentiel de charge hydraulique	h

Le transport de l'eau se produit à cause d'une différence de potentiel total. Ce potentiel total est composé des potentiels correspondant aux différentes forces qui s'appliquent à l'eau de la ZNS: gravité, capillarité + adsorption (matriciel), pression hydrostatique et dans certains cas, osmose, pression pneumatique et pression de confinement.

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_o \quad \dots (3- 3)$$

$$\Psi_p = \Psi_m + \Psi_a \quad \dots \text{si } \Psi_p < 0 \quad \dots (3- 4)$$

$$\Psi_p = \Psi_h \quad \dots \text{si } \Psi_p > 0 \quad \dots (3- 5)$$

où les indices *t*, *p*, *g*, *o*, *m*, *a* et *h* correspondent au potentiel total, de pression, gravitationnel, osmotique, matriciel, pneumatique et hydrostatique, respectivement. L'équation 3-5 correspond à un matériau saturé : le potentiel de pression est égal au potentiel hydrostatique. Les autres valeurs (eq. 3-4) deviennent égales à zéro étant donné qu'il n'y a plus de phase gazeuse dans les pores. Le potentiel pneumatique (Ψ_a) représente la différence entre la pression de l'air dans la ZNS et la pression atmosphérique, laquelle est prise comme référence. Cette différence est souvent négligeable. Le potentiel matriciel est assimilable au potentiel de pression en milieu non saturé. Le potentiel osmotique n'est pris en compte que s'il existe des gradients importants de concentration et/ou des « membranes » qui maintiennent des gradients plus ou moins permanents (cas des racines des plantes). Par contre, si les ions se déplacent librement dans la solution, le potentiel osmotique est le même partout dans le milieu et donc il est négligeable (Dirksen, 1999).

Le **potentiel total** de l'eau dans le sol peut s'exprimer en énergie potentielle divisée par le poids de l'eau [Travail/Force] = [L]:

$$H = h_m + z \quad \dots (3- 6)$$

où H est la charge hydraulique totale, h_m , la charge matricielle et z , la charge gravitationnelle. La charge hydraulique, H , est égale à la pression relative Ψ_t divisée par ρ_w et g . Pour un point quelconque dans l'espace, z est égal à la hauteur par rapport à une référence arbitraire, $z=0$. Dans les sols non saturés, cette hauteur est négative, car la référence arbitraire d'altitude est prise, le plus souvent, à la surface du sol. La succion s d'un matériau non saturé est représentée par la valeur absolue du potentiel matriciel :

$$s = |h_m| \quad \dots (3-7)$$

La succion peut aussi s'exprimer en échelle logarithmique, dont pF : $\text{Log}|h_m| = \text{Log}(s)$ (Fuchsberger and Kirchengast, 2013) :

La **pression capillaire**, P_c (m), à l'interface gaz-liquide dans un pore de rayon r (m) (Hopmans et al., 2002) est :

$$P_c = P_w - P_a = \frac{-2\sigma \cos(\gamma)}{\rho_w g r} = \frac{A'}{r} \quad \dots (3-8)$$

où P_w est la pression de l'eau, P_a est la pression de l'air, σ est la tension superficielle de l'eau (N/m), γ est l'angle de contact entre l'interface liquide-gaz et l'interface liquide-solide, ρ_w est la masse volumique de l'eau (Kg/m³), g est l'accélération de la pesanteur (9,8 m/s²), A' est une valeur constante négative ($-1,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$).

Grâce à la force de capillarité, le matériau poreux retient l'eau face à la gravité.

3.3. Teneur en eau et courbe de rétention en eau

La teneur en eau d'un matériau de la ZNS peut s'exprimer en référence à la masse du matériau sec (teneur en eau gravimétrique, w , [M.M⁻¹]) ou au volume total (teneur en eau volumique, θ , [L³.L⁻³]). Elle peut aussi s'exprimer à travers le degré de saturation, S_e (rapport entre la teneur en eau volumique, θ , et la porosité, Φ) (Dane et Hopmans, 2002).

La courbe de rétention en eau d'un matériau poreux est la relation entre sa teneur en eau volumique (θ) et son potentiel matriciel (h)*. L'état hydrique d'un sol est lié à son potentiel matriciel. La rétention en eau est l'une des propriétés les plus importantes des matériaux poreux, qui permet de caractériser le comportement hydrique des milieux poreux non saturés.

On considère que l'eau et l'air sont les fluides mouillant et non mouillant, respectivement, présents dans le milieu poreux. On considère que le milieu est rigide et homogène (Hopmans et al., 2002). Une représentation caractéristique de la courbe de rétention en eau est présentée dans la figure 3-2.

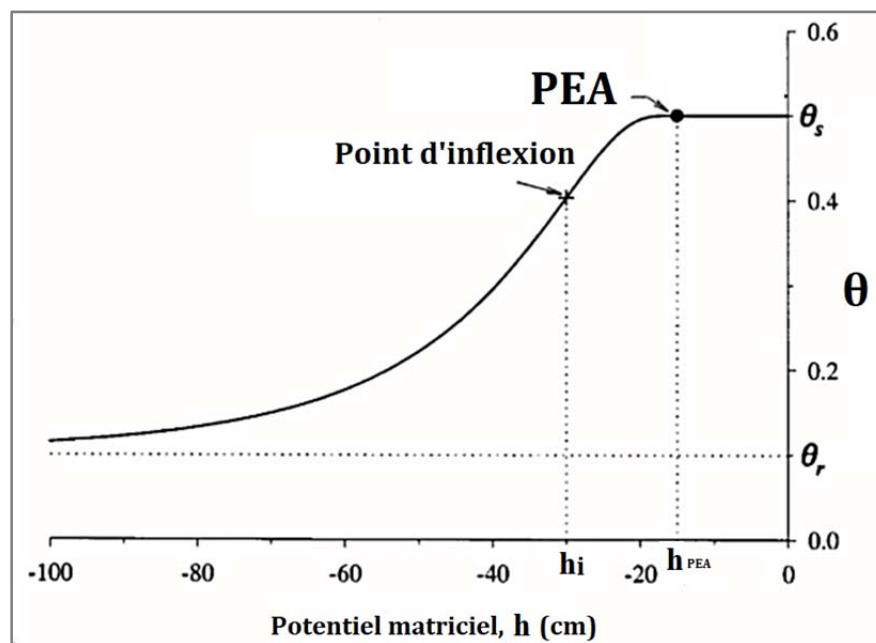


Figure 3- 2 Graphique typique d'une courbe de rétention en eau d'un sol (Hopmans et al., 2002). PEA est le potentiel au point d'entrée d'air, θ_s est la teneur en eau volumique à l'état de saturation et θ_r est la teneur en eau volumique résiduelle à l'état sec.

Par définition, la teneur en eau volumique à l'état saturé est égale à θ_s , quand le potentiel matriciel est égal à zéro.

* On simplifiera la notation du potentiel matriciel en h au lieu d' h_m , dans la suite du manuscrit.

La valeur du potentiel matricielle à laquelle le matériau commence à se désaturer est définie comme son potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA). Cette valeur est inversement proportionnelle à la taille maximale des pores connectés. Lorsque h_m diminue en deçà du PEA, θ diminue de façon asymptotique vers une teneur en eau minimale définie comme teneur en eau résiduelle, θ_r . La raison pour laquelle θ_r peut être une valeur différente de zéro est due au fait que les mesures de teneur en eau sont faites principalement dans la gamme humide et que les modèles typiques de courbes de rétention extrapolent un comportement asymptotique aux faibles valeurs de teneurs en eau (en dehors de la gamme de mesure). La nature de θ_r reste controversée étant donné que la teneur en eau tend vers zéro si le potentiel matriciel devient largement négatif. Dans la pratique, θ_r est un paramètre à ajuster (Hopmans et al., 2002). Comme la plupart des modèles de rétention décrivent des courbes dans une gamme de valeurs entre θ_r et θ_s (Hopmans et al., 2002), on exprime la saturation effective du matériau avec la relation suivante :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \dots (3-9)$$

S_e varie entre 0 et 1. La courbe de rétention en eau, $\theta(h_m)$, peut être décrite par différents modèles mathématiques. Le plus courant est le modèle de van Genuchten, 1980:

$$S_e(h) = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad \dots (3-10)$$

où α [L^{-1}] est un paramètre inversement proportionnel au potentiel au point d'inflexion de la courbe $\theta(h)$ (fig 3-2). Les paramètres n et $m=1-1/n$ sont des coefficients empiriques sans unité.

Le tableau 3-4 présente une synthèse des paramètres moyens pour les textures les plus souvent trouvées pour les sols.

Tableau 3- 4 Tableau de synthèse des paramètres du modèle de van Genuchten (1980), avec $m=1-1/n$ et K_{sat} , la conductivité hydraulique à saturation, pour différentes textures de sol selon l'USDA (Carsel et Parrish, 1988 d'après Hopmans et al., 2002).

Texture	θ_s	θ_r	α	n	K_s
	cm^{-1}				cm d^{-1}
Sand	0.43	0.045	0.145	2.68	712.8
Loamy sand	0.41	0.057	0.124	2.28	350.2
Sandy loam	0.41	0.065	0.075	1.89	106.1
Loam	0.43	0.078	0.036	1.56	24.96
Silt	0.46	0.034	0.016	1.37	6.00
Silt loam	0.45	0.067	0.020	1.41	10.80
Sandy clay loam	0.39	0.100	0.059	1.48	31.44
Clay loam	0.41	0.095	0.019	1.31	6.24
Silty clay loam	0.43	0.089	0.010	1.23	1.68
Sandy clay	0.38	0.100	0.027	1.23	2.88
Silty clay	0.36	0.070	0.005	1.09	0.48
Clay	0.38	0.068	0.008	1.09	4.80

La courbe de rétention montrée dans la figure 3-2 est directement liée à la distribution de taille des pores du matériau. La distribution volumique de taille de pores, $g(r)$, peut s'exprimer :

$$g(r) = \frac{d\theta}{dr} \quad \dots (3- 11)$$

où la dimension de $g(r)$ est $[L^{-1}]$. Dans l'équation 3-11, $g(r)dr=d\theta$ représente la contribution des pores de rayon $(r + dr)$ à la teneur en eau $\theta + d\theta$. La contribution volumique de la teneur en eau des pores avec un rayon inférieur ou égal ou majeur à r_1 peut être calculée par l'intégration de l'équation 3-11:

$$\theta = \int_0^{r_1} g(r)dr + \theta_r \quad \dots (3- 12)$$

En présence de forces de capillarité, la relation entre r et h est définie par la fonction de Laplace-Young (eq. 3-3, avec $h=P_c$), l'équation 3-12 peut alors s'écrire :

$$\theta = \int_{-\infty}^{h_1} g(r) \left(\frac{dr}{dh} \right) dh + \theta_r = \int_{-\infty}^{h_1} f(h)dh + \theta_r \quad \dots (3- 13)$$

où $h_1 = A'/r_1$ et

$$f(h) = g(r) \left(\frac{dr}{dh} \right) = \frac{d\theta}{dh} \quad \dots (3-14)$$

La fonction $f(h)$ caractérise donc la distribution de taille des pores en fonction du potentiel matriciel du matériau. Elle correspond à la capacité capillaire, qui représente la pente de la courbe de rétention dans la figure 3-2.

$$C(h) = f(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad \dots (3-15)$$

Pour résoudre l'équation de Richards (§3.4.2.2), la fonction $C(h)$ doit être connue. $C(h)$ peut être explicitement calculée à partir de la dérivée par rapport à h de la fonction $\theta(h)$ qui décrit la courbe de rétention en eau du matériau.

3.3.1. Effet des propriétés du matériau sur sa courbe de rétention en eau

La quantité d'eau retenue dans les matériaux poreux aux valeurs faibles de succion (0-100 KPa) est dépendante des effets de capillarité et donc de la distribution de taille de pores. Les sols sableux ont beaucoup de pores de grande taille et la plupart de l'eau est libérée à des faibles valeurs de succion, tandis que les sols argileux libèrent des quantités largement moins importantes dans les mêmes conditions et retiennent des quantités d'eau relativement élevées, même dans des conditions de succion élevée. Cette rétention élevée de l'eau par les sols argileux est liée à l'adsorption de l'eau sur les particules d'argile. D'après la figure 3-3, un sol argileux peut stocker jusqu'à 30 % de son volume total pour une succion d'environ 1000 KPa (10 bar). C'est-à-dire qu'il faudra augmenter la succion au-delà de 10 bars pour arriver à faire sortir l'eau. Par contre, pour un sol avec une texture sableuse, 10 KPa suffisent pour faire baisser la teneur en eau jusqu'à environ 10 %. Pour une succion de 100 KPa, il y aura environ 5 % d'eau volumique dans le volume total du sol sableux.

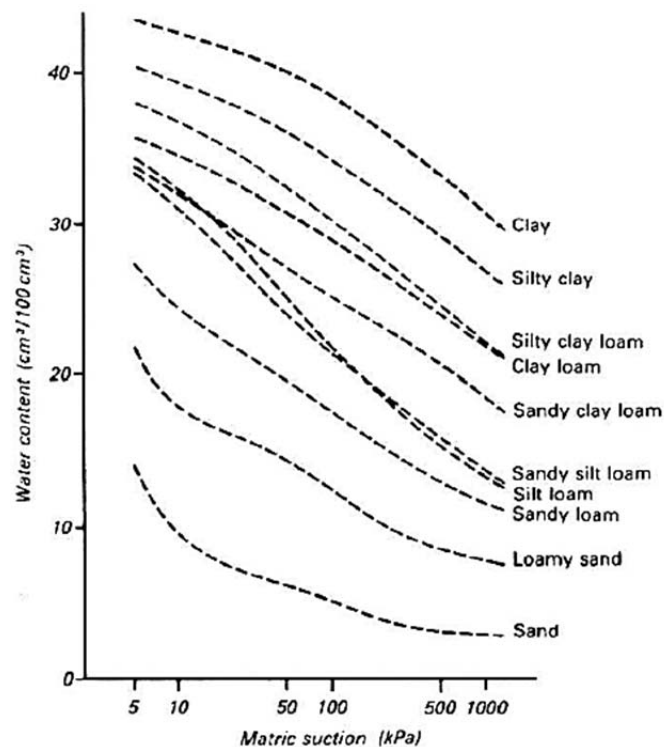


Figure 3- 3 Courbes de rétention en eau de sols de différentes textures (Hall et al. 1977 d'après Smith and Mullins, 2001).

La minéralogie des argiles est importante aussi dans le déterminisme de la rétention en eau. La présence d'argiles de type smectite, dont les valeurs de CEC et la surface spécifique sont relativement élevées, favorise l'adsorption de l'eau, ce qui entraîne une rétention importante aux suctions élevées. La matière organique augmente également la rétention de l'eau, notamment à de faibles valeurs de succion. Cependant, pour les sols riches en MO, la rétention à des valeurs élevées de succion est plutôt faible.

3.3.2. Hystérésis

L'hystérésis est un phénomène provoquant une différence entre les courbes de rétention correspondant au drainage (diminution de la teneur en eau) et à l'humidification (augmentation de la teneur en eau) d'un sol (fig. 3-4). Cela signifie qu'à potentiel matriciel fixé, un sol contient plus d'eau en phase de drainage qu'en phase d'humectation.

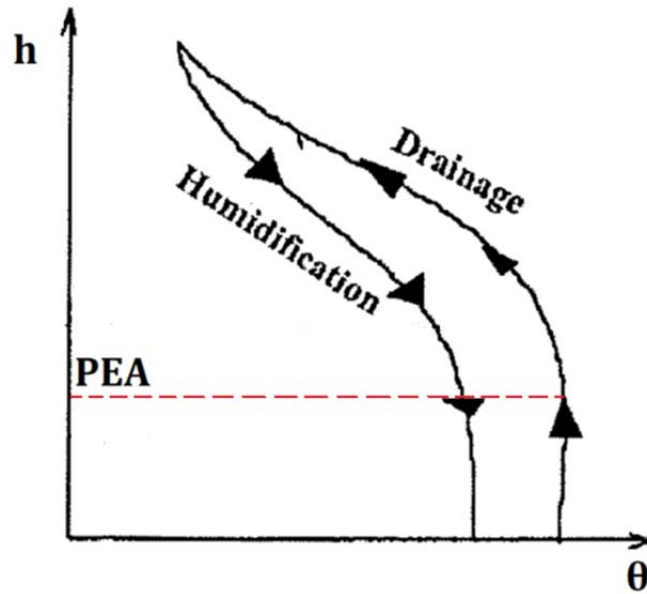


Figure 3- 4 Courbes de rétention de l'eau montrant les deux branches de l'hystérésis lors de l'huméctation et du drainage. Le fait que les deux courbes n'arrivent pas au même point sur l'axe des abscisses indique que la réhumectation n'est pas totale (Chossat, 2005).

3.4. Les phénomènes de transfert d'eau dans les matériaux de la ZNS

3.4.1. Ecoulements en milieu saturé

3.4.1.1 Loi de Darcy

L'écoulement dans un milieu poreux saturé a été décrit par Darcy (1846) comme une relation linéaire entre le débit d'eau Q [$L^3.T^{-1}$] et la différence de charge hydraulique, ΔH [L], appliquée:

$$Q = \frac{A \times K_{sat} \times \Delta H}{L} \quad \dots (3- 16)$$

où A est la surface de la section perpendiculaire à l'écoulement [L^2], L est la longueur de l'échantillon traversé [L], K_{sat} la conductivité hydraulique saturée au matériau [$L.T^{-1}$]. Le rapport $\Delta H/L$ représente le gradient de charge hydraulique dans l'échantillon (Craft and Hawkins, 1990).

Darcy (1886) présente un coefficient de proportionnalité pour faire référence à une vitesse de filtration dans le milieu qui résulterait de l'imposition d'un gradient unité. Ce coefficient de proportionnalité est dénommé *conductivité hydraulique*. Ce coefficient est caractéristique des conditions d'écoulement dans un matériau donné pour un fluide donné tandis que la perméabilité est une caractéristique propre du matériau..

A partir de la loi de Darcy, on peut définir la perméabilité k comme la capacité d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel de pression du fluide. La relation entre ces deux paramètres est la suivante :

$$K_{sat} = k \left(\frac{\rho_w g}{\mu} \right) \dots (3-17)$$

où k est la perméabilité intrinsèque du matériau [L^2], g est l'accélération de la pesanteur [$L.T^{-2}$], μ est la viscosité dynamique du fluide [$M^{-1}L^2.T^{-1}$], K_{sat} est la conductivité hydraulique saturée [$L.T^{-1}$] (Chossat, 2005).

La perméabilité k est indépendante du fluide et seulement fonction de la taille des grains, de leur forme et de leur arrangement. Selon la définition de la perméabilité, pour un matériau caractérisé par une perméabilité de 1 Darcy, un gradient de pression de 1 bar/cm engendre un débit de 1 cm^3/s d'un fluide avec une viscosité de 1 centipoise traversant une surface de 1 cm^2 (Sammartino, 1998, après de Marsily, 1981).

3.4.1.2 Validité et limites de la loi de Darcy

Les conditions suivantes doivent être prises en compte pour l'application de la loi de Darcy (Ahmed, 2001) :

- i) écoulement de type laminaire,
- ii) pas de réaction entre l'eau et la phase solide, et
- iii) un échantillon homogène saturé.

Le premier critère peut être vérifié par le calcul du nombre de Reynolds, Re . Dans un milieu poreux, on considère que l'écoulement est laminaire, si la condition suivante est présente: $Re \leq 1$. Il est possible de calculer ce paramètre à l'aide de la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho V D_p}{\mu} \dots (3-18)$$

où ρ est la masse volumique du fluide [$M.L^{-3}$], V est la vitesse du fluide [$L.T^{-1}$], D_p est le diamètre moyen des pores dans lesquelles le fluide s'écoule [L] et μ est la viscosité dynamique du fluide [$ML^{-1}T^{-1}$].

Lorsque la vitesse de l'eau dans un capillaire est faible, les filets liquides sont continus, rectilignes et parallèles. Ce régime est dit laminaire. On peut déceler une variation de la vitesse suivant la position du point dans la section du tube : le long des parois la vitesse est nulle en raison des frottements. C'est au centre du tube que la vitesse est la plus forte (Chossat, 2005).

Dans le graphique log-log de la figure 3-5 ci-dessous, on voit que les points expérimentaux s'alignent sur une ligne droite de la forme :

$$C_f = \frac{1000}{R_e} \quad \dots (3-19)$$

Le coefficient C_f est le coefficient de résistance d'un matériau à l'écoulement de fluides en son sein. C_f est un indice qui dépend de la tortuosité et de la rugosité. Il est fonction de R_e et de la rugosité de la surface en contact avec le fluide traversant le milieu (Tiab and Donaldson, 2004). Le domaine de validité de la loi de Darcy correspond à la partie linéaire de la courbe. Au-delà de $R_e = 10$, le comportement n'est plus linéaire et la pente diminue (fig. 3-5). La limite supérieure du domaine de validité de la loi de Darcy est aux alentours d'une valeur de $R_e=1$ (Chossat, 2005). Cette loi a été établie pour un écoulement monophasique sans interaction physico-chimique entre le fluide et le solide (Beck, 2006).

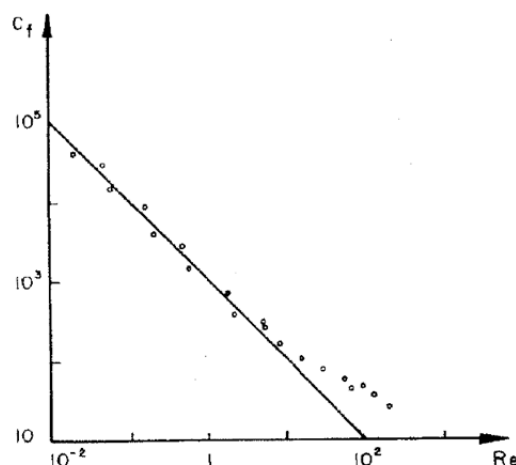


Figure 3- 5 Relation entre le coefficient de résistance, C_f , et le nombre de Reynolds, R_e (Chossat, 2005).

3.4.2. Ecoulements en milieu non saturé

3.4.2.1 Généralisation de la loi de Darcy

La loi de Darcy permet de calculer les débits transitant dans un sol saturé à partir de la détermination de la valeur de K en milieu saturé. Néanmoins, lorsque la teneur en eau diminue, les pores les plus grands se vident. Après la vidange, une pellicule d'eau subsiste plus ou moins longtemps sur les parois, tant qu'une force extérieure (extraction par une racine, évaporation) ne viendra pas la mobiliser. Cette pellicule liée par les forces de contact à la phase solide permet d'assurer la continuité de la phase aqueuse au sein du système poral (Chossat, 2005).

C'est Buckingham en 1907 (Liu, 2017) qui a généralisé la loi de Darcy aux milieux non saturés. Il propose d'exprimer l'équation de l'écoulement pour la loi de Darcy en élargissant le gradient de charge à celui de potentiel, de la façon suivante :

$$q = -K(h)\nabla H \quad \dots (3- 20)$$

où ∇H est le gradient de potentiel total [$L.L^{-1}$], $K(h)$ est la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel [$L.T^{-1}$], q est la densité de flux volumique [$L.T^{-1}$].

De façon à simplifier le traitement mathématique et expérimental des processus d'écoulement en milieu non saturé, il est souvent intéressant de transformer l'équation d'écoulement en lui donnant une forme analogue à celle de l'équation de diffusion ou de conduction de la chaleur, pour lesquelles il existe des solutions mathématiques simples à mettre en œuvre (Chossat, 2005).

Dans cette optique, on peut écrire l'équation de Buckingham en utilisant le concept de diffusivité:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad \dots (3- 21)$$

Cette grandeur a des dimensions similaires à un coefficient de diffusion [$L^2.T^{-1}$]. Pour cette raison, $D(\theta)$ est nommé diffusivité hydraulique.

$$q = -D(\theta) \nabla \theta \quad \dots (3-22)$$

On peut écrire l'équation 3-20 dans le cas où il n'y a pas d'écoulements latéraux ou horizontaux:

$$q = -K(h) \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad \dots (3-23)$$

Le coefficient de proportionnalité de l'équation 3-23 est la conductivité hydraulique exprimée en [L.T⁻¹]. Les fractions $\left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)$ et $\left(\frac{\partial z}{\partial z} \right)$ représentent le gradient de potentiel matriciel et le gradient de potentiel gravitaire, respectivement.

La magnitude de $K(h)$ est déterminée par la géométrie des pores. Cette variable varie de plusieurs ordres de grandeur en fonction de θ . K varie largement pour différents types de sols et la fonction $K(\theta)$ est très difficile à mesurer de façon précise. La conductivité hydraulique à saturation, K_{sat} , peut être néanmoins mesurée plus facilement.

3.4.2.2 Equation de Richards

Le transport d'eau doit satisfaire la condition de conservation de la matière selon l'équation de continuité. Pour un transport monodimensionnel, l'équation de continuité est exprimée par :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} \quad \dots (3-24)$$

où t est le temps [T], et z est la coordonnée spatiale, [L]. En conditions stationnaires, toutes les variables sont constantes dans le temps et donc toutes les dérivées sont égales à zéro, et donc, la densité de flux est constante tout au long de z . Donc, pour la condition stationnaire monodimensionnelle dans une colonne de sol, la densité de flux est la même partout (Dirksen, 1999)

Dans les équations 3-22 et 3-24, il n'y a plus qu'une seule variable : la teneur en eau volumique θ .

L'équation de Richards correspond au couplage de l'équation de Buckingham (3-20) et de l'équation de continuité (3-24). Elle s'écrit de la façon suivante pour un écoulement vertical:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) \dots (3-25)$$

Cette équation peut être résolue de façon numérique en utilisant soit une formulation entièrement en fonction de h avec le remplacement $\partial \theta / \partial t$ par $[C(h) \partial h / \partial z]$, soit par la formulation mixte représentée par l'équation 3-25 (Celia et al., 1990 d'après Dane et Hopmans, 2001).

L'équation 3-25 est généralement associée aux hypothèses suivantes : écoulement isotherme, la phase d'air n'est pas miscible à la phase aqueuse et la rétention en eau est unique (non hystérétique) et indépendante du débit.

3.4.2.3 Equations mathématiques pour décrire la caractéristique de conductivité hydraulique

Le modèle plus souvent utilisé pour décrire de la conductivité hydraulique non saturée est celui de Mualem (1976), lequel est couplé avec le modèle de van Genuchten (1980) pour arriver à l'expression suivante:

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \dots (3-26)$$

où K_{sat} représente la conductivité hydraulique saturée [$L.T^{-1}$], S_e est la saturation effective, l exprime la connectivité dans les pores [-], et m est le coefficient de la relation de van Genuchten.

La plupart des modèles hydrauliques supposent le couplage entre $K(\theta)$ et $\theta(h)$ avec des paramètres communs. Cependant, la modélisation n'a pas besoin d'un couplage entre ces deux propriétés. En fait, l'optimisation des paramètres est améliorée quand ils sont découplés (Vogel et al. 1999 et Durner et al. 1999a d'après Hopmans et al., 2002). Il a

été aussi démontré qu'il y a plus de flexibilité pour représenter les courbes de rétention en utilisant des distributions de pores bimodales (Durner, 1994 d'après Hopmans et al., 2002). Typiquement, le nombre de paramètres à optimiser dans les fonctions hydrauliques est compris entre 4 et 7. Quelques paramètres sont mesurés indépendamment (par exemple, θ_s), d'autres ne le sont que très rarement (tortuosité, l).

CHAPITRE 4: TECHNIQUES D'ETUDE AU LABORATOIRE DES PROPRIETES HYDRIQUES DES MATERIAUX NON SATURES

Les propriétés de transfert de l'eau de la ZNS peuvent être décrites en caractérisant les deux relations suivantes: la courbe de rétention en eau et la courbe de conductivité hydraulique des matériaux non saturés. De nombreux auteurs ont mesuré expérimentalement ces deux caractéristiques avec des techniques et dispositifs variés.

Les méthodes dites « du débit d'extraction » rassemblent, sous une même méthode de laboratoire, plusieurs techniques utilisées pour la détermination de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et en régime variable (Chossat, 2005). Ces méthodes sont le plus souvent réalisées avec les mêmes matériels que ceux qui servent à la détermination de la courbe caractéristique de rétention en eau.

4.1. Presse de Richards

En 1943, Richards et Fireman ont introduit une technique expérimentale pour mesurer la courbe de rétention d'un sol avec une presse de confinement (Cresswell et al., 2008). Cette méthode a été standardisée et est aujourd'hui connue comme la méthode de la presse de Richards. Elle consiste à placer un échantillon de sol saturé sur une céramique poreuse à l'intérieur d'une chambre pressurisée (fig. 4-1). Selon la taille de l'enceinte, le volume des échantillons peut varier entre 10 cm³ et 250 cm³. De l'autre côté de la céramique (plaque poreuse), la pression est celle de la salle expérimentale (atmosphère) ce qui induit un gradient hydraulique et donc un écoulement de l'eau de l'échantillon à travers celle-ci.

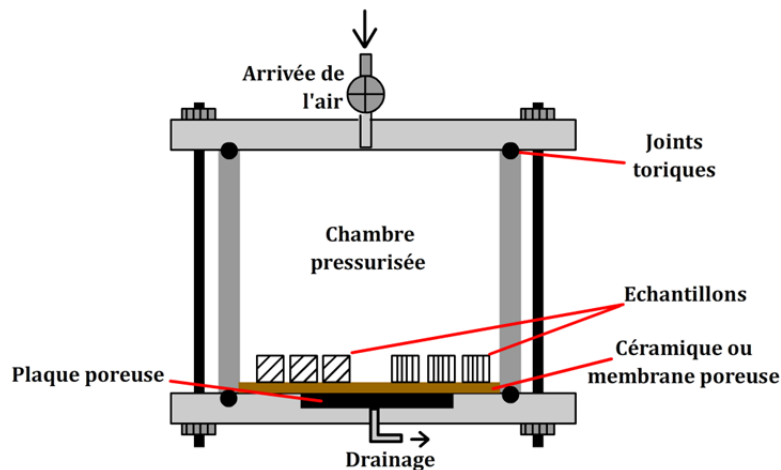


Figure 4- 1 Schéma de la presse de (Richards, 1948)

Théoriquement, l'écoulement s'arrête quand l'équilibre hydrique est atteint (Cresswell et al., 2008). Les pressions souvent appliquées à l'intérieur de la cellule, pour avoir une description de la courbe de rétention, peuvent aller de p_F 1 (10 cm) jusqu'à p_F 4,2 (1,5 MPa). Campbell (1985) d'après Cresswell et al. (2008) a parlé de l'imprécision de la méthode dès le moment où une fine couche à la base de l'échantillon est désaturée, car la conductivité hydraulique très faible de cette dernière bloque le drainage et empêche d'atteindre l'équilibre, notamment si l'échantillon a une texture sableuse grossière.

4.2. La méthode des deux plaques

Cette méthode, proposée par Richards en 1931, peut être considérée comme une des premières déterminations simultanées des courbes caractéristiques de rétention en eau et de conductivité hydraulique d'échantillons de sol (Chossat, 2005). La méthode consiste à placer un échantillon, contenu dans un cylindre rigide de prélèvement, entre deux plaques poreuses, maintenues à deux charges de pression différentes mais constantes (fig. 4-2). Le débit d'extraction volumique est mesuré dans une burette à pas de temps réguliers. Le gradient de pression est calculé à partir de valeurs de pression matricielle données par deux tensiomètres posés dans l'échantillon de sol près des plaques en céramiques poreuses.

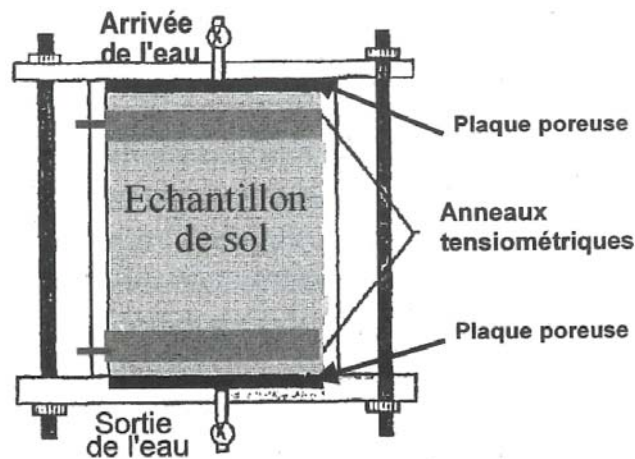


Figure 4- 2 Schéma de la méthode des deux plaques d'après Klute et al. (1986) (Chossat, 2005).

De nombreux auteurs qui ont travaillé sur ce type d'essai ont depuis mis au point des cellules qui permettent de réguler cette pression (Chossat, 2005).

4.3. La méthode de Wind

Wind a mis au point en 1966 une méthode basée sur l'évaporation, d'abord introduite par Gardner et Miklich en 1962 (Hopmans et al., 2002). L'échantillon saturé est placé sur une balance monoplateau pour mesurer la perte en eau par évaporation par la surface supérieure. L'échantillon est équipé d'au minimum deux tensiomètres placés à deux profondeurs différentes (fig. 4-3). La tendance est actuellement à la suppression de la balance et à son remplacement par des sondes de détermination de la teneur en eau (type TDR). Le diamètre de l'échantillon peut varier entre 7 cm et 15 cm et la hauteur varie entre 5 et 10 cm.



Figure 4- 3 Schéma du montage utilisé pour la méthode de Wind (Frison, 2008).

Wendroth et al., (1993) ont utilisé la méthode de Wind pour mesurer les propriétés hydriques de trois types de sol différents (sablo-limoneux, limoneux et argileux). Ils ont conclu que la méthode d'évaporation présente des difficultés pour les mesures des propriétés à l'état proche de la saturation, quand les valeurs de conductivité hydraulique sont élevées, car le gradient hydraulique n'est pas obtenu avec suffisamment de précision. Cependant, les auteurs ont noté que la simplicité, le faible coût et l'élégance de la méthode sont des aspects positifs.

4.4. La méthode par centrifugation

Caputo et Nimmo (2005) ont étudié les propriétés hydriques sur des échantillons de roches de 3 cm de diamètre par 6 cm de hauteur à l'aide d'une technique par centrifugation quasi-stationnaire (fig. 4-4). L'état hydrique de l'échantillon est contrôlé par une pompe externe de dosage, tandis que l'échantillon est désaturé par palier de centrifugation. Les auteurs ont conclu que, si la force de centrifugation est suffisamment élevée, elle devient la force principale et dominante, et donc la teneur en eau, le débit d'extraction et le potentiel matriciel peuvent donner des valeurs de conductivité hydraulique et des courbes de rétention en eau assez précises. Si les conditions expérimentales sont respectées, la conductivité hydraulique est calculée en utilisant la loi de Darcy exprimée en fonction de la vitesse angulaire:

$$q = -K(\theta) \left(\frac{dh}{dr} - \frac{\omega^2 r_e}{g} \right) \dots (4-1)$$

où q est la densité de flux [LT^{-1}], K est la conductivité hydraulique non saturée [LT^{-1}], θ est la teneur en eau volumique [L^3L^{-3}], h est le potentiel matriciel [L], r_e est le rayon de l'échantillon [L], ω est la vitesse angulaire [T^{-1}] et g est la accélération de la pesanteur [$L \cdot T^{-2}$]



Figure 4- 4 Schéma du montage utilisé pour la méthode de centrifugation (Caputo and Nimmo, 2005)

Les données de propriétés hydriques ont été comparées avec la méthode de Wind avec des résultats satisfaisants (fig. 4-5). Pour les échantillons de type A, les résultats obtenus montrent que les deux méthodes donnent des valeurs similaires notamment pour la conductivité hydraulique. Pour les échantillons de type B, les résultats des propriétés hydriques sont similaires dans la gamme des teneurs en eau mesurées.

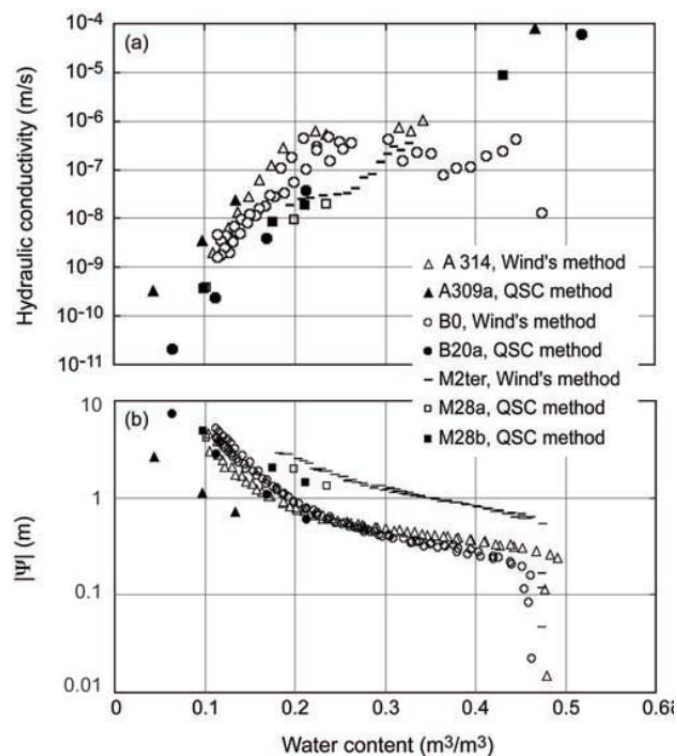


Figure 4- 5 Résultats des propriétés hydriques pour trois lithotypes de calcarénite mesurés à l'aide de la méthode de centrifugation (QSC). Le lithotype A est caractérisé par une texture de type grainstone* de taille moyenne riche en lithoclastes, le lithotype B est caractérisé par une texture de type packstone* riche en bioclastes de taille moyenne et le lithotype M possède une texture fine de type wackestone* moyennement cimentée (Caputo et Nimmo, 2005). * Classification de Dunham.

Les valeurs de teneurs en eau pour les deux types d'échantillons (A et B) sont très similaires. Les résultats obtenus pour les échantillons de type M sont cohérents pour les courbes de rétention en eau, mais il existe certaines différences pour les courbes de conductivité hydraulique. Les différences observées entre les trois typologies sont probablement liées à la présence d'éléments grossiers, issus de processus de diagenèse, mais aussi à la nature des échantillons pour chaque méthode étant donné que les échantillons sont différents entre chaque méthode.

4.5. La méthode du perméamètre à paroi flexible (cellule triaxiale).

Le système triaxial ou à paroi flexible est un dispositif élaboré pour réaliser des tests en mécanique des sols en milieu saturé (consolidation, cisaillement, écrasement, etc.), en imposant des contraintes mécaniques dans les trois directions de l'espace (Chossat, 2005). Une membrane en latex ou en caoutchouc placée autour de l'échantillon évite la communication hydraulique entre l'échantillon et le fluide contenu dans la cellule, qui permet d'appliquer une contrainte mécanique à l'échantillon. Cette contrainte doit être telle que la membrane reste toujours bien collée à l'échantillon, ce qui permet d'éviter le passage préférentiel de l'eau entre la membrane et l'échantillon. Les autres pressions imposées (eau, air) sont directement exercés sur l'échantillon (fig. 4-6).

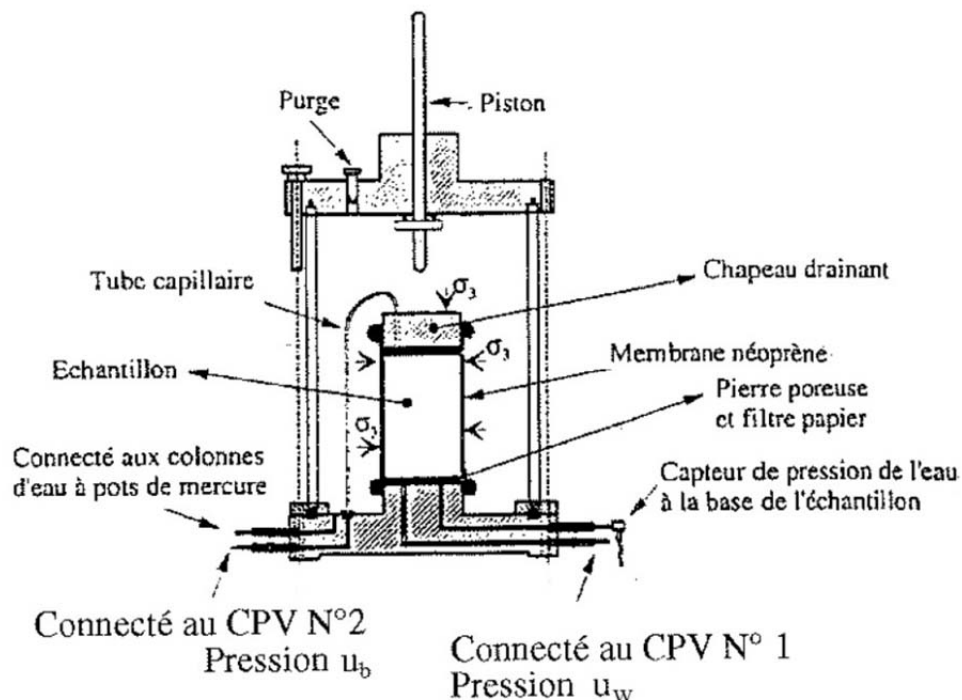


Figure 4- 6 Vue en détail de la cellule et de l'échantillon avec les diverses connexions (d'après Chossat, 2005). u_b est la pression au niveau du chapeau drainant appliquée à l'aide d'un contrôleur pression-volume (CPV), u_w est la pression au niveau du piédestal et σ_3 est la pression dans la cellule.

Ce dispositif peut mesurer de très faibles débits à travers l'échantillon de sol saturé, sous un gradient de pression donné et constant. La méthode présentée ci-après met en œuvre un équipement permettant de mesurer avec précision une large gamme de débits. Il permet aussi de contrôler la pression de l'eau et les variations de volume de l'échantillon testé (Chossat, 2005).

La gamme de mesure de la conductivité hydraulique est de 10^{-3} à 10^{-12} m/s. Parmi les inconvénients rencontrés, on trouve la durée d'un essai, notamment pour un échantillon peu perméable ou argileux dont un essai peut prendre entre 5 et 7 jours. Le prix de l'ensemble pourrait aussi représenter une limitation. Cette technique est classiquement réservée à la géotechnique ou à la mécanique de sols, mais rien n'empêche de mesurer la conductivité hydraulique des sols avec ce dispositif. Chaque composante du dispositif peut être utilisée indépendamment, ce qui permet d'adapter les éléments en fonction des besoins.

Le principe de fonctionnement est d'appliquer un gradient de potentiel de l'eau (régime laminaire monodimensionnel) à travers un échantillon cylindrique saturé en eau, de sorte à générer un flux de la base vers le sommet de l'échantillon. La loi de Darcy est alors utilisée pour calculer la conductivité hydraulique à saturation de l'échantillon, K_{sat} .

La composante principale du dispositif est une cellule de confinement (fig. 4-6). A l'intérieur de la cellule, on applique à l'échantillon une pression de confinement, σ_3 , par de l'eau sous pression. Le système de mise en pression utilisé autrefois dans les laboratoires était une colonne d'eau à pots de mercure, mais actuellement c'est interdit (Chossat, 2005). On impose les différentes pressions avec des contrôleurs pression-volume (CPV) de façon indépendante selon les besoins et de façon automatisée.

Barbour et al. (1998) ont mesuré la conductivité hydraulique d'un sol déformable limono-sableux en conditions non saturées à l'aide d'une cellule triaxiale. Cette technique a permis d'appliquer différentes contraintes normales nettes et de succion matricielle et d'observer l'évolution de la conductivité hydraulique.

Le perméamètre triaxial développé par Barbour et al. (1998) est inclut par une cellule triaxiale et un panneau de contrôle avec une tuyauterie en cuivre. La cellule triaxiale a été modifiée par Fredlund à partir du modèle développé par Ho (1988) (Barbour et al., 1998). Le schéma de la cellule est présenté dans la figure 4-7.

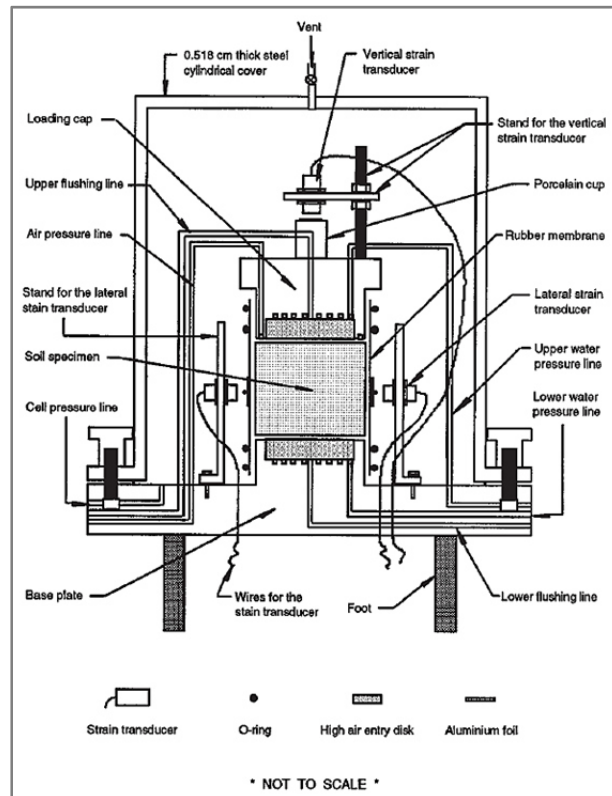


Figure 4- 7 Schéma du montage de la cellule triaxiale (Barbour et al., 1998).

Deux céramiques poreuses sont utilisées dans le système. Une céramique est installée dans le piédestal (« base plate », fig. 4-7) et l'autre est installée dans le chapeau drainant (« loading cap »). Dans le dispositif de Fredlund, le potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA) des céramiques est de 1 bar et leur conductivité hydraulique à saturation est de $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s. La variation de volume de l'échantillon non saturé est mesurée à l'aide de capteurs de déplacement installés autour de l'échantillon et au-dessus du chapeau drainant (fig. 4-7).

Le schéma de distribution des tuyaux est présenté dans la figure 4-8. La pression de l'eau dans les pores au niveau du chapeau drainant est contrôlée par le régulateur C lequel est actionné par la pression d'air provenant du régulateur A (effet piston). Le volume d'eau en aval (chapeau drainant) est mesuré avec des burettes jaugées

(résolution de $0,02 \text{ cm}^3$). La pression de l'eau dans les pores au niveau du piédestal (amont) est contrôlée par le régulateur D avec le même principe que celui côté aval.

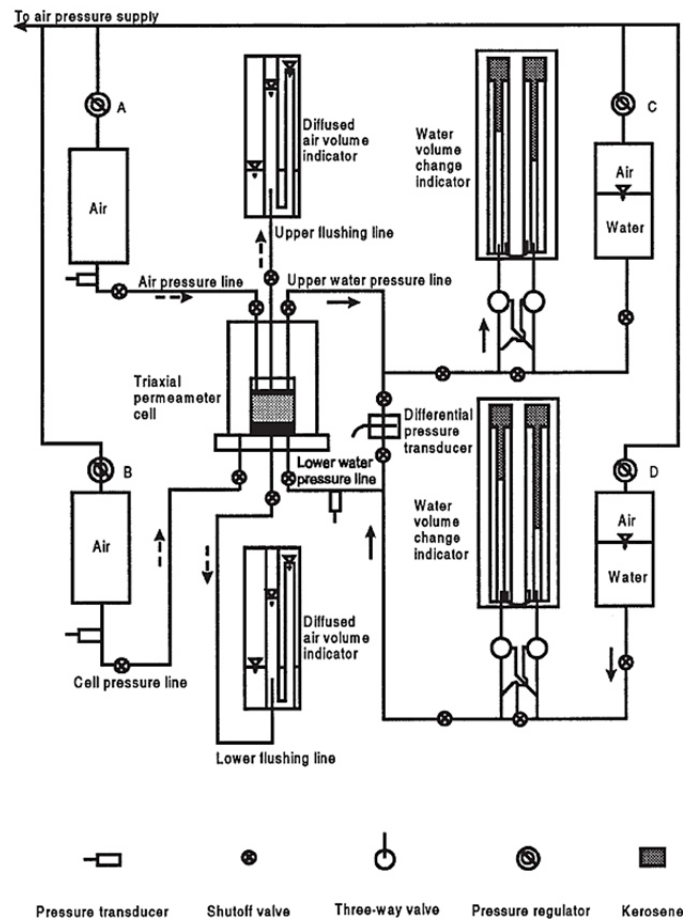


Figure 4- 8 Schéma du système triaxial et ses composants (Barbour et al., 1998).

La pression d'air, contrôlée par le régulateur A, est enregistrée avec un transducteur. L'air comprimé est appliqué à l'échantillon via le chapeau drainant. La pression de confinement au niveau de la cellule, enregistrée par un transducteur, est appliquée avec l'air stocké dans le régulateur B. Les lignes de purge (amont et aval) ont été conçues pour faire sortir les bulles d'air piégées dans les compartiments remplis d'eau.

Les pressions d'eau dans les pores appliquées en amont et en aval imposent une différence de pression hydrique dans l'échantillon qui varie entre 2 et 4 KPa. Cette différence de pression est enregistrée avec un transducteur de pression différentielle de précision. La succion dans l'échantillon est calculée comme la valeur moyenne de la succion entre le sommet et la base de l'échantillon.

La technique de translation de pression (§4.7) a été appliquée pour éviter la cavitation de l'eau dans le système de mesure (Barbour et al., 1998, après Hilf, 1956). Après le montage de l'échantillon dans la cellule, le protocole expérimental comprend les étapes suivantes : 1) une consolidation isotrope de l'échantillon est appliquée dans la cellule, 2) la conductivité hydraulique saturée est mesurée en régime permanent, 3) la succion matricielle est augmentée et la consolidation dans l'échantillon reste constante. Pour cela, la pression d'air dans l'échantillon et la pression d'eau dans la cellule sont augmentées simultanément et graduellement, 4) l'échantillon est désaturé de sorte à aboutir à un potentiel matriciel inférieur à zéro. Une charge de pression hydraulique est appliquée à chaque extrémité de l'échantillon. Les variations de volume en entrée et en sortie de l'échantillon sont enregistrées. L'équilibre dans l'échantillon est atteint quand la différence entre le débit en amont et le débit en aval est inférieur à 5% du débit moyen. Les données enregistrées pendant cette période sont utilisées pour calculer la conductivité hydraulique à la succion matricielle correspondante, selon la loi de Darcy, 5) les étapes 3 et 4 sont répétées pour des valeurs de succion plus élevées jusqu'à ce que la succion atteigne 90 KPa (0,9 bar).

Les valeurs de conductivité hydraulique mesurées les plus faibles sont de l'ordre de 10^{-11} m/s et les plus élevées de l'ordre de 10^{-8} m/s. La déformation de l'échantillon peut être difficile à mesurer avec précision, car les éprouvettes peuvent subir une déformation asymétrique à proximité du chapeau drainant et du piédestal. Cependant, les transducteurs de déformation apportent une information qualitative sur la variation du volume en fonction du potentiel matriciel (fig. 4-9). L'un de résultats importants est que, pour des valeurs de succion entre zéro et le PEA des échantillons, la conductivité hydraulique du sol diminue très peu tandis que la variation du volume de l'échantillon peut être considérable. Néanmoins, au-delà de la valeur de PEA, la conductivité hydraulique diminue de façon exponentielle et la variation de volume total de l'échantillon est généralement imperceptible (Barbour et al., 1998). La conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle $K(h)$ ne change pas beaucoup en présence d'une succion faible (inférieure à 20 KPa) (fig. 4-10). Quand la succion augmente au-delà du PEA, $K(h)$ diminue rapidement. $K(h)$ suit une relation bilinéaire dans une échelle logarithmique, similaire au modèle de Brooks and Corey (1964) (Barbour et al., 1998).

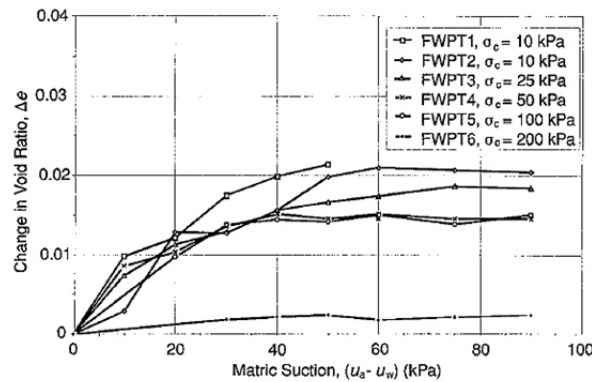


Figure 4- 9 Variation de l'indice des vides en fonction de la succion matricielle. σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon dans la cellule (Barbour et al., 1998). FWPT : « flexible-wall permeability tests ».

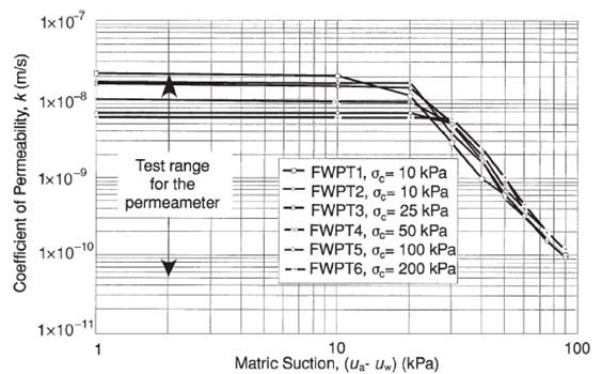


Figure 4- 10 Courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle obtenues à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible (Barbour et al., 1998).

4.6. La méthode du débit d'extraction en étapes (« steps »)

Parmi ces méthodes, on distingue deux procédures, suivant l'amplitude de l'intervalle de pression: i) la procédure « *one-step method* » pour les méthodes prenant en compte un intervalle de mesure large, ii) les procédures « *multi-step* » pour les méthodes utilisant plusieurs intervalles de mesure courts.

4.6.1. La méthode « *one-step* »

Cette méthode a été proposée par Gardner (1962). Le principe (fig. 4-11) consiste à appliquer une grande variation du potentiel matriciel et à mesurer le débit d'extraction (Gardner, 1962 d'après Chossat, 2005). Les données de débit sont ensuite analysées pour obtenir la fonction de diffusion pour un large éventail de valeurs de teneur en eau.

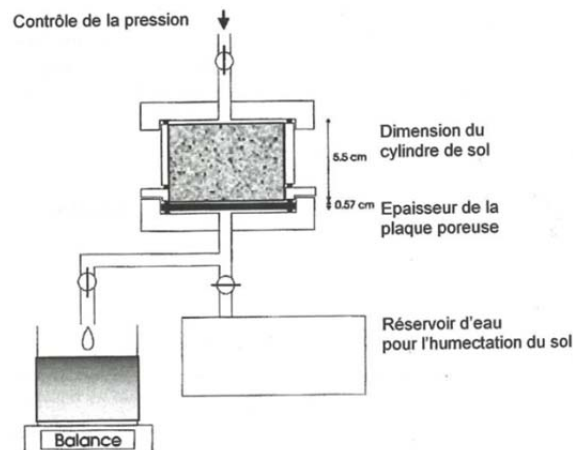


Figure 4- 11 Extracteur à plaque poreuse pour la méthode « one-step outflow » (Chossat 2005, après Gardner, 1962).

On fait l'hypothèse que la pression de l'eau juste au-dessous de la céramique poreuse représente la pression capillaire dans l'échantillon immédiatement au-dessus de la céramique poreuse ou de la membrane poreuse. Cette façon de mesurer la pression capillaire donne de meilleurs résultats que celle qui utilise des tensiomètres insérés dans l'échantillon, car les tensiomètres, dans certains types de sols, perdent fréquemment le contact avec le sol environnant pour les très faibles teneurs en eau (Chossat, 2005).

La membrane ou céramique poreuse permet de saturer l'échantillon et de le drainer lorsque le potentiel matriciel est inférieur à 0 (Mualem et Klute, 1984). Les auteurs ont précisé que la conductance de la membrane ne doit pas être faible par rapport à la conductance de l'échantillon pour éviter la perte de charge hydraulique à travers la membrane. La conductance à l'interface membrane-échantillon change à cause de la migration de colloïdes ou à cause de l'activité biologique dans le système (Mualem et Klute, 1984). Cependant, les auteurs ont trouvé qu'il existe une relation entre la conductance de la membrane et la teneur en eau de l'échantillon qui contribue à la résistance de l'interface.

4.6.2. La méthode « multi-step »

Gardner (1956) a proposé la méthode multi-step outflow comme alternative à la méthode one-step que lui-même avait proposée (Chossat, 2005). Cette méthode a inspiré de nombreux chercheurs (tels que Eching et al., 1994; van Dam et al., 1994).

Certains d'entre eux ont montré que la méthode multi-step permettait d'identifier les paramètres hydrauliques du modèle de Mualem-van Genuchten.

Le principe général consiste à observer, sur un échantillon de sol initialement saturé que l'on va dessécher, les variations de débit Q à chaque variation successive de potentiel matriciel imposé (van Dam et al. 1990 d'après Chossat, 2005) et à enregistrer ces variations de débit durant chacune des étapes (*steps*). La courbe caractéristique de rétention en eau peut être calculée à partir de ces valeurs en utilisant le potentiel matriciel et la teneur en eau à l'équilibre pour chaque incrément.

Pour montrer la nécessité d'avoir suffisamment de mesures de potentiel matriciel pendant les mesures de propriétés hydriques, van Dam et al. (1994) ont réalisé des expériences dans lesquels la pression pneumatique (fig. 4-12) était augmentée successivement par étapes (sans tensiomètres).

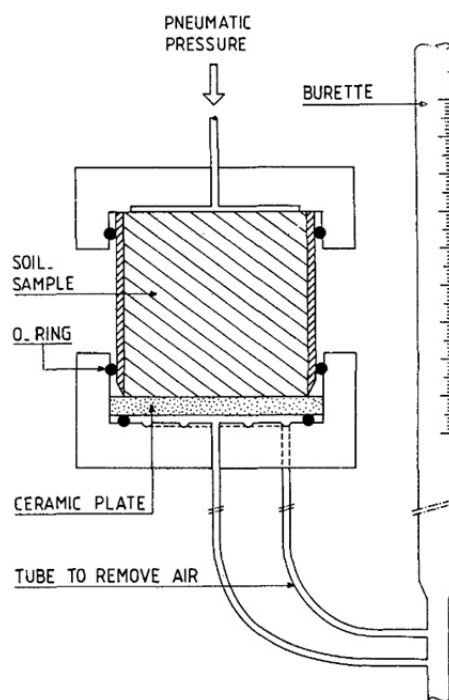


Figure 4- 12 Section transversale du montage pour l'application de la méthode « *multi-step* » (van Dam et al., 1994).

Les données acquises ont montré qu'il était possible d'avoir suffisamment d'information pour arriver à des estimations uniques des fonctions hydriques des sols. La méthode multi-step est recommandée aussi par Durner et al. (1999b) après l'avoir comparée avec la méthode one-step (Hopmans et al., 2002). Cependant, ces auteurs ont conclu que le

couplage de données tensiométriques avec la mesure du débit cumulé rend les estimations des courbes de rétention et de conductivité hydraulique plus précises pour une gamme plus importante de textures de sol. La méthode multi-step requière les mêmes types de matériel que ceux utilisé pour la méthode one-step. Il peut y avoir de modifications pour automatiser et améliorer l'acquisition des données.

Eching et al. (1994) ont utilisé la méthode multi-step pour ensuite appliquer la technique d'inversion par minimisation entre les données d'outflow mesurées et les données calculées par simulation. Ils ont étudié des échantillons de quatre types de sols : limoneux, argilo-sableux, limono-sableux et sable fin. Selon les résultats obtenus, l'ajustement des courbes de la conductivité hydraulique correspond bien avec les mesures directes, sauf pour le sol sableux. Une mesure supplémentaire du potentiel matriciel dans la procédure d'optimisation permet cependant d'obtenir une solution unique des paramètres de la fonction de la conductivité hydraulique.

Ces auteurs ont conclu aussi que le couplage des données tensiométriques (multi-step avec tensiomètres) avec le débit cumulé rend les estimations des courbes de rétention et de conductivité hydraulique plus précises pour une gamme plus importante de texture de sol.

Hopmans et al. (2001) ont mis au point un dispositif expérimental (fig. 4-13) qui suit le même principe que la méthode des deux plaques (fig. 4-2). Il utilise un ou deux tensiomètres couplés avec des transducteurs de pression (Wildenschild et al., 2001 d'après Hopmans et al., 2002). La membrane poreuse peut être une plaque céramique ou une membrane nylon avec un PEA suffisamment élevé pour éviter l'apparition de bulles au niveau de la burette. Ce problème peut être réduit par l'injection d'azote au lieu d'air (Hopmans et al., 2002). La mesure en continu du débit d'extraction à la sortie est réalisée à l'aide d'un transducteur de pression installé dans la base de la burette.

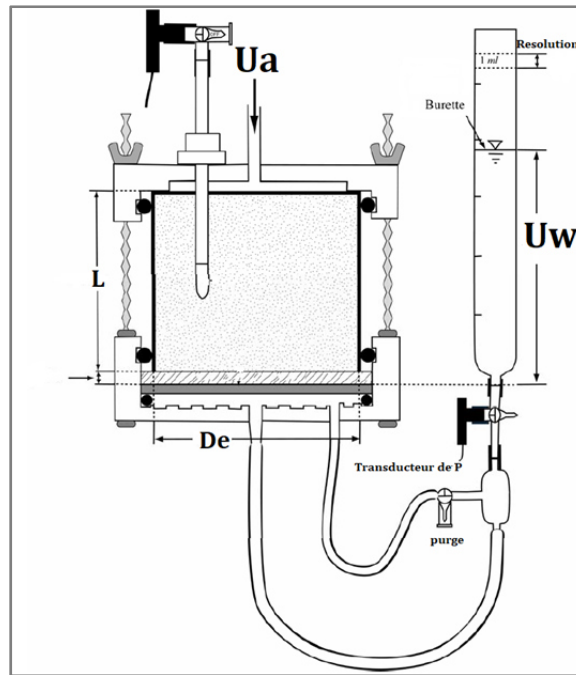


Figure 4- 13 Schéma du montage pour l'application de la méthode « *multi-step outflow* » (Hopmans et al., 2001). U_a est la pression d'injection de l'air ou d'azote, L est la hauteur de l'échantillon, D_e est le diamètre de l'échantillon, U_w est la pression de l'eau dans les pores

Le protocole de la méthode multistep que nous avons appliqué a été adapté en fonction d'un montage différent de celui de la figure 4-13. L'ensemble des instruments utilisés font partie d'un système triaxial statique non conventionnel.

4.6.2.1 Considérations à prendre en compte lors d'un essai multi-step

1. Le nombre et les valeurs des incréments de pression ne sont pas connus a priori. Idéalement, il faudrait choisir des incréments tels que le débit de sortie cumulé soit égal pour chaque incrément (Hopmans et al., 2002).
2. La durée de chaque incrément de pression doit être prise en compte ainsi que la durée d'un essai complet. Plusieurs chercheurs (dont Schultze et al., 1999) ont démontré que des durées courtes (24 heures) par incrément peuvent améliorer les mesures et diminuer la diffusion d'air au-dessous de la plaque poreuse. Les essais de longue durée peuvent également engendrer une croissance microbienne, notamment si de la matière organique est présente dans l'échantillon.
3. Il est important de réduire le plus possible l'influence de la membrane poreuse (céramique pour le système triaxial) pour pouvoir améliorer la sensibilité des paramètres à optimiser. L'impédance hydraulique de la membrane ou de la céramique doit être largement inférieure à celle de l'échantillon non saturé. Pour éviter de fausser

les mesures, les données acquises sont corrigées de l'effet de l'impédance de la membrane ou de la céramique.

4. Les dimensions de l'échantillon ne sont pas strictement imposées. Cependant, la longueur de la colonne pourrait modifier les paramètres de deux façons différentes. On pourrait attendre une sensibilité plus élevée pour les paramètres liés à la conductivité hydraulique pour des éprouvettes longues (5-20 cm). Par contre, la sensibilité des paramètres de la courbe de rétention en eau augmente pour une hauteur moins importante. Hopmans et al. (2002) recommandent une hauteur comprise entre 1 et 6 cm.

Etant donné que le temps pour atteindre l'équilibre hydrique d'un échantillon est proportionnel à sa hauteur, il est conseillé d'utiliser des échantillons de 2 à 3 cm de hauteur pour diminuer la durée de l'essai, mais il n'est pas conseillé d'aller en dessous de 2 cm car cela pourrait rendre difficile la manipulation de l'échantillon (Hopmans et al., 2002). Le diamètre de l'échantillon est dans une gamme comprise entre 5 et 8 cm. Le diamètre et la hauteur de l'échantillon doivent être plus grands que la taille des unités structurales observées dans l'échantillon (macropores, cavités, fissures, agrégats, cristaux, etc.).

4.6.2.2 Domaine de validité de la méthode

Les hypothèses suivantes sont prises en compte: la résistance hydraulique de la plaque poreuse doit être faible devant celle du matériau; le flux est considéré monodimensionnel; le gradient de gravité doit être négligeable; l'échantillon doit être homogène.

La figure 4-14 présente un exemple d'acquisition classique de données brutes avec la méthode « multi-step ».

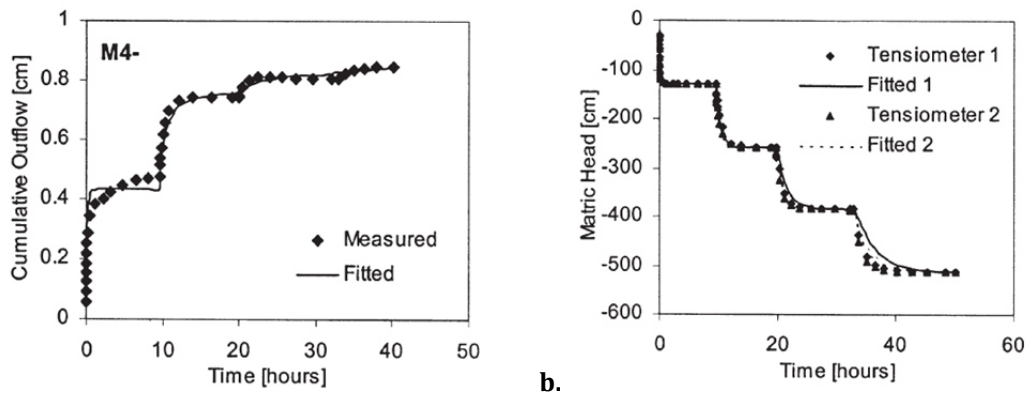


Figure 4- 14 Données brutes de débit d'extraction (à gauche) et données tensiométriques (à droite) après une expérience avec la méthode *multistep* (Hopmans et al., 2002).

4.7. Technique de translation de pression

Il est utile de décrire une technique utilisée pour éviter plusieurs problèmes de mesure, notamment ceux qui sont liés à la formation de bulles d'air au niveau de la céramique poreuse et à la présence de bulles d'air dans le système de circulation de la phase liquide (fig. 4-15).

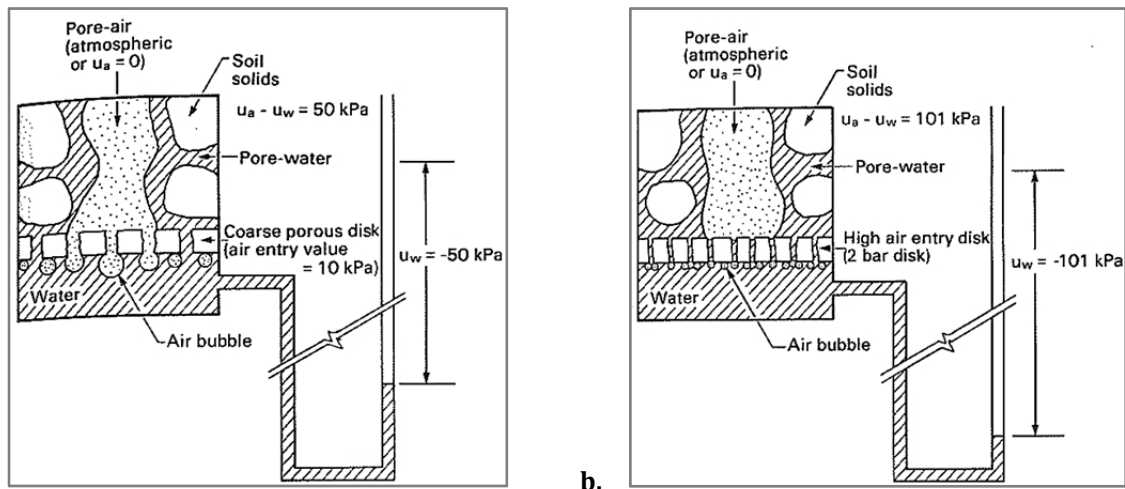


Figure 4- 15 a) Mouvement de bulles d'air à travers la céramique quand son potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA) est dépassé; b) Formation d'air à travers la céramique à cause de la cavitation de l'eau dans le système en aval (Fredlund and Rahardjo, 1993).

L'adaptation du système triaxial pour pouvoir passer en conditions non saturées nécessite la mesure et le contrôle indépendants de la pression d'air et d'eau dans les pores. Pendant les mesures en conditions non saturées, la pression relative de l'eau dans les pores est négative, ce qui la rend mobile sensible à la cavitation (fig. 4-15-b).

La technique de translation de pression est la base des essais de laboratoire en conditions non saturées pour une large gamme de potentiel matriciel. Une limitation des

techniques de mesure directes est liée au fait que l'eau cavite autour d'une pression d'eau de -1 atm (-101 KPa). Malgré un potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PAE) élevé (ex.: -202 KPa), l'eau apparait en dessous de la céramique, car l'eau commence à caviter (fig. 4-15-b). Le résultat est le blocage du système en aval à cause de l'accumulation d'air. Cela produit une erreur dans la valeur de volume cumulé car le volume sera surestimé à cause de l'expansion de l'air.

Cette limitation de la mesure directe est palliée par l'application de la technique de translation de pression. Elle consiste à déplacer la pression de référence ou pression d'air pour la rendre supérieure à la pression atmosphérique. La pression d'eau dans les pores est alors référencée par rapport à une pression d'air positive par rapport à la pression atmosphérique (Hilf, 1956 d'après Fredlund and Rahardjo, 1993)

La figure 4-16 présente la description de la succion matricielle lors de la technique de translation par application de la loi de Laplace.

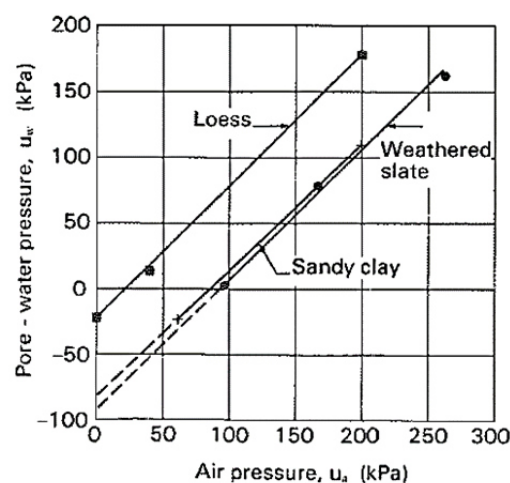


Figure 4- 16 Translation de pression appliquée à 3 échantillons (Fredlund et Rahardjo, 1993).

La pression d'air est égale à la pression extérieure appliquée à l'échantillon. La pression de pore d'eau négative est augmentée tout en gardant la même différence de pression par rapport à la pression d'air. C'est-à-dire que la valeur de pression capillaire reste constante malgré la translation de ces deux grandeurs. Finalement, la pression d'eau est augmentée jusqu'à atteindre une valeur positive et éviter le phénomène de cavitation. La technique a été appliquée avec succès par différents chercheurs tels que Bishop and

Donald, 1961; Gibbs and Coffey, 1969b ; Fredlund, 1973 ; Hoad Fredlund, 1982a; Gan et al. 1988.

L'application de cette technique pour des périodes de temps prolongées ne garantit pas l'absence de bulles d'air dans le système (Fredlund et Rahardjo, 1993). Les matériaux de la ZNS nécessitent des essais de longue durée à cause de leurs faibles valeurs de conductivité hydraulique. Si l'exsolution ou cavitation est présente, il faudra corriger le volume cumulé du volume d'air formé. Le comportement du volume cumulé en présence d'accumulation d'air en aval de la céramique est présenté dans la figure 4-17.

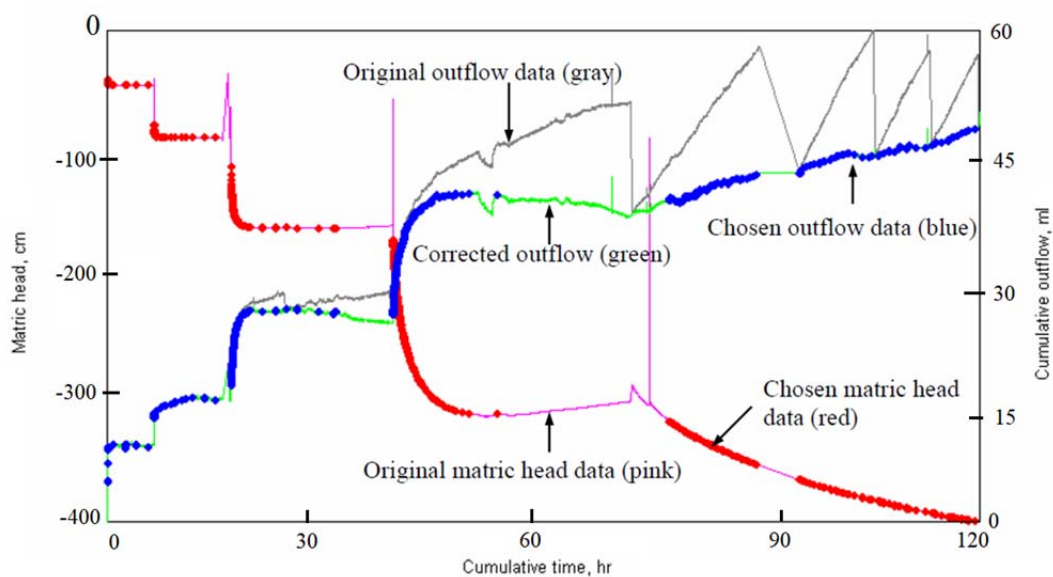


Figure 4- 17 Correction des données de débit d'extraction (en vert) à cause de la formation de bulles d'air à la sortie d'une céramique poreuse pendant un essai « multi-step outflow » (Hopmans et al., 2001).

Les données brutes du débit d'extraction enregistrées sont corrigées pour éviter la surestimation du flux et la sous-estimation des propriétés de rétention du matériau. La technique de translation de pression permet également de dissoudre l'air piégé dans le système étant donné que la pression de référence est plus élevée que celle à laquelle les bulles d'air se forment dans la phase liquide. Cette situation améliore aussi les résultats de la mesure de la conductivité hydraulique à saturation.

4.8. Choix du dispositif

Le choix du dispositif pour la mesure des propriétés hydriques des matériaux de la ZNS s'est appuyé sur les contraintes techniques liées à la nature des matériaux. L'idée était d'avoir un dispositif adapté à toute la gamme des faciès rencontrés dans la ZNS du système hydrogéologique étudié.

La recherche bibliographique sur les techniques existantes a mis en évidence les avantages et les faiblesses de chaque technique. Le dispositif à mettre en œuvre doit inclure les aspects suivants:

i. La possibilité d'obtenir simultanément la rétention en eau et la conductivité hydraulique en condition non saturée.

Toutes les méthodes citées préalablement sont capables de mesurer les deux propriétés hydriques simultanément, sauf la presse de Richards, qui ne permet d'obtenir que la courbe de rétention en eau des échantillons. Cependant, nous l'utiliserons pour comparer les mesures de rétention en eau avec celles obtenues à l'aide du dispositif choisi.

ii. La possibilité de pouvoir enchaîner les essais en condition saturée et en condition non saturée sur un même échantillon sans devoir changer de montage.

La plupart des techniques étudiées sont exclusivement consacrées à l'étude des propriétés en conditions de saturation variable, comme par exemple la méthode de Wind, la méthode des deux plaques ou la cellule de pression de Hopmans. Si le dispositif n'est pas adapté aux conditions de saturation, il faut utiliser deux montages différents, ce qui risque d'abimer ou de perturber les échantillons. Ce n'est pas le cas ni pour le système triaxial ni pour la méthode de centrifugation.

iii. Le système de mesure doit pouvoir s'adapter à une gamme d'échantillons de différentes natures, compte tenu de l'hétérogénéité des faciès.

La nature des échantillons représente une contrainte pour le système de mesure. Par exemple, les méthodes où l'échantillon est solidaire de l'anneau de prélèvement (méthode de Wind, cellule de Hopmans, méthode des deux plaques) sont conçues pour les matériaux meubles (sol, sable, limon, sédiments meubles). La technique de

prélèvement utilisée pour ces dispositifs rend impossible les essais avec les faciès de roche à cause du faux contact entre la paroi du cylindre et l'échantillon ce qui impacte l'étanchéité et facilite l'écoulement préférentiel entre la paroi et l'échantillon lors d'un essai à saturation.

iv. Les mesures doivent être précises. L'influence de perturbations externes, telles que l'évaporation, les changements de température, doivent être prises en compte.

La mesure précise d'un faible débit représente un défi. Les essais en conditions non saturées entraînent des volumes en sortie généralement faibles (quelques mm³) ce qui nécessite des capteurs précis et de bonne résolution. En présence de faibles volumes d'eau cumulés, l'évaporation de l'eau obtenue en sortie et les changements de température de la salle expérimentale peuvent impacter les volumes quantifiés.

v. Le dispositif doit être capable de reproduire les conditions de terrain, notamment l'effet de consolidation pour les couches plus profondes.

Le seul dispositif qui permette d'imposer une contrainte physique de confinement similaire à celle du terrain est le système triaxial à paroi flexible. Toutes les autres techniques négligent l'effet de pression lithostatique dû aux couches sus-jacentes.

vi. La compatibilité des composants du système de mesure.

La plupart des systèmes de mesure étudiés ont besoin d'adaptations pour pouvoir mesurer les paramètres d'intérêt. Par exemple, Hopmans et al. (2001) ont adapté un capteur de pression à une burette graduée pour pouvoir mesurer le volume en sortie. Avec un système de burettes, il existe le risque d'évaporation de l'eau drainée étant donné que la burette doit rester ouverte à l'atmosphère. Caputo et Nimmo (2005) ont modifié tout l'ensemble porte-échantillon (réservoir supérieur, collecteur inférieur, céramique poreuse, dimensions du cylindre porte échantillon) pour pouvoir injecter de l'eau dans l'échantillon et aussi pour la récupérer en aval (fig. 4-4). Toutes ces modifications ont été faites, car il n'existe pas de centrifugeuses sur le marché pour ce type de manipulation. Barbour et al. (1998) ont équipé les réservoirs d'eau et d'air avec des capteurs pour pouvoir injecter de l'eau et de gaz dans leur système. Les auteurs ont fait des adaptations aussi dans le piédestal et dans le chapeau drainant, en installant des céramiques poreuses pour imposer les conditions de succion. Cependant, ils ont eu des

problèmes de fuites au niveau des joints au niveau des céramiques poreuses à l'intérieur de la cellule.

vii. Utilisation du dispositif avec la méthode multi-step.

La méthode multistep en régime transitoire permet de mesurer simultanément les paramètres de succion et de débit (§4.6.2) pour arriver à des estimations uniques des fonctions hydriques. L'idée était donc de pouvoir adapter la méthode de débit d'extraction multi-step au dispositif choisi. Le système triaxial permet cette adaptation grâce à l'interdépendance entre les contrôleurs de pression-volume (§4.5) et sa haute résolution et précision.

viii. La possibilité d'automatiser les étapes de mesure, qui ont une durée de temps de plusieurs jours à plusieurs semaines selon la nature de l'échantillon.

L'automatisation des protocoles représente un enjeu majeur. Le dispositif choisi (triaxial) compte un logiciel conçu expressément pour contrôler chaque composante du montage. Il est possible de créer des bases des données qui facilitent énormément la tâche. Cela permet de gagner du temps et diminue le temps de présence au laboratoire devant la machine. Aucune autre méthode étudiée n'était automatisée ni couplée à aucun logiciel.

ix. Palier au problème de cavitation et de formation de bulles dans le système.

Vu la robustesse du système triaxial, il est possible d'appliquer sans aucun problème la technique de translation de pression pour éviter les problèmes de bulles d'air dans les compartiments d'eau. Cela élimine les problèmes rencontrés avec les montages classiques utilisés en physique de sols qui travaillent à la même pression que celle de la salle expérimentale.

La méthode choisie pour atteindre les objectifs de ce travail de recherche est la méthode multi-step (voir section 4.6.2) couplée avec le système triaxial (voir section 4.5). La description précise du dispositif sera faite dans la partie II du manuscrit.

CHAPITRE 5: ETUDES DE CAS. AQUIFERES ET ZONE NON SATUREE

5.1. Mesure des propriétés hydriques non saturées de couches sédimentaires profondes dans l'Idaho, USA.

Perkins (2003) et Perkins et al. (2014) ont étudié les couches sédimentaires de la ZNS à l'est du bassin «Snake River Plain» dans l'Idaho à l'aide de la méthode par centrifugation établie par Caputo and Nimmo (2005).

La ZNS de l'aquifère de Snake River est composée d'une séquence de couches basaltiques parfois fracturées, intercalées avec des sédiments meubles d'origine fluviale et lacustre et des dépôts éoliens argilo-sableux (fig. 5-1). Toutes ces conditions entraînent des écoulements préférentiels d'eaux résiduelles et de polluants. Des radionucléides ont été repérés dans les eaux souterraines, issus de l'infiltration à travers des puits de déchets construits pour stocker les eaux usées provenant du centre de technologie nucléaire (INTEC).

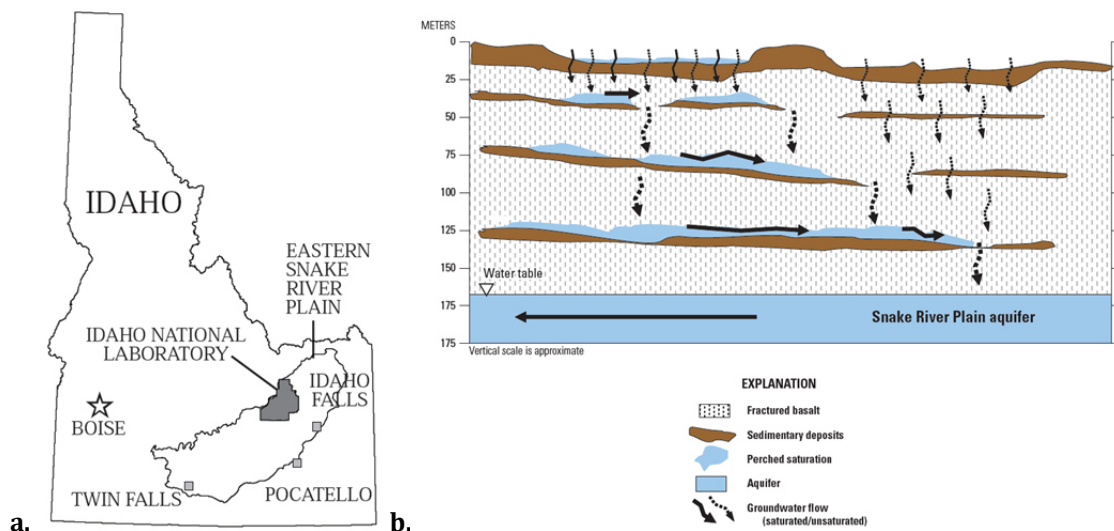


Figure 5- 1 a) Carte de l'état d'Idaho et localisation du site d'étude, b) Modèle conceptuel du sous-sol qui présente les zones potentielles d'écoulement dans la zone non saturée à l'est de l'aquifère « Snake River Plain » dans l'Idaho (Perkins et al., 2014).

Douze carottes provenant des sédiments de la ZNS proche des installations de stockage de déchets de faible radioactivité de l'INTEC ont été étudiées pour mesurer leurs propriétés hydriques au laboratoire. La technique de mesure utilisée est celle de la centrifugeuse en régime permanent couplée avec l'équation angulaire de Darcy (§4.4).

La gamme de valeurs de conductivité hydraulique obtenue va de $1,42 \times 10^{-3}$ cm/s pour un échantillon sablo-argileux jusqu'à $1,66 \times 10^{-7}$ cm/s pour un échantillon limono-argileux. Selon les courbes de conductivité hydraulique obtenues en fonction de la teneur en eau, il existe une forte hétérogénéité verticale dans la partie supérieure de la structure à cause de la présence des minéraux argileux dans certaines couches. La faible conductivité hydraulique des couches argileuses produit l'accumulation d'eau d'infiltration, qui est responsable d'écoulements latéraux vers des zones de fractures au niveau des roches basaltiques intercalées avec les sédiments meubles de la ZNS (Perkins, 2003).

Un modèle basé sur les propriétés physiques (masse volumique des grains et des échantillons, distribution de taille de particules et coefficient d'uniformité) a été utilisé pour le calcul de la conductivité hydraulique. Pour chaque échantillon, l'ajustement entre les données mesurées et les données calculées a été vérifié.

Les prédictions des valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) ont montré un coefficient de corrélation entre valeurs estimées et mesurées pouvant atteindre 0,922. Des corrélations similaires ont été observées pour les prédictions de teneur en eau à saturation (θ_{sat}) avec la valeur la plus élevée à 0,892. Les corrélations obtenues ont démontré que le modèle de prédiction était cohérent avec les propriétés mesurées au laboratoire, ce qui permet d'extrapoler le modèle pour quantifier les propriétés hydriques non saturées dans différents endroits du site d'étude (Perkins et al., 2014).

5.2. Analyse du transport de solutés à travers un aquifère alluvial hétérogène dans le site expérimental de Krauthausen.

Dans le site expérimental de Krauthausen, des travaux de suivi de polluants ont été menés par Vereecken *et al.* (2000). Le transport de bromure de sodium (NaBr) comme traceur inerte et de l'uranine ($C_{20}H_{20}Na_2O_5$) et du chlorure de lithium (LiCl) comme traceurs réactifs a été étudié dans l'aquifère hétérogène peu profond de ce site. Des résultats préalables expérimentaux et théoriques ont montré que la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique entraîne une dispersion des solutés plus importante que celle attendue si l'on utilise des modèles de transport avec des paramètres obtenus à

partir des colonnes expérimentales (Pickens et Grisak, 1981; Gelhar, 1986; Arya et al., 1988 d'après Vereecken et al., 2000). Une première approche *in situ* a caractérisé la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique, les densités de flux, les propriétés des sédiments et les paramètres de sorption du lithium et de l'uranine. Les résultats du traçage de bromure ont été présentés à l'aide d'une équation stochastique de transport.

Le site expérimental de Krauthausen se trouve à environ 10 Km au nord-ouest de la ville de Düren et à 6 Km du centre de recherche de Jülich, en Allemagne (fig. 5-2). Les sédiments de l'aquifère sont d'origine alluviale. La lithologie de l'aquifère est comprise par deux grands épisodes de sédimentation. La partie inférieure appartient aux sédiments du fleuve Rhin et comprend des sédiments sableux avec une texture moyenne à fine et des intercalations argileuses peu épaisses. La partie supérieure est comprise par des sédiments graveleux et sableux provenant de la Ruhr. La nappe de l'aquifère se trouve au niveau de la transition entre les deux épisodes (« Lower terrace - Lower middle terrace of river Rur »). Dans le site d'étude, le niveau de nappe se situe à environ 2,5 m de profondeur sauf pendant l'hiver, saison lors de laquelle l'eau remonte à 1 m de la surface.

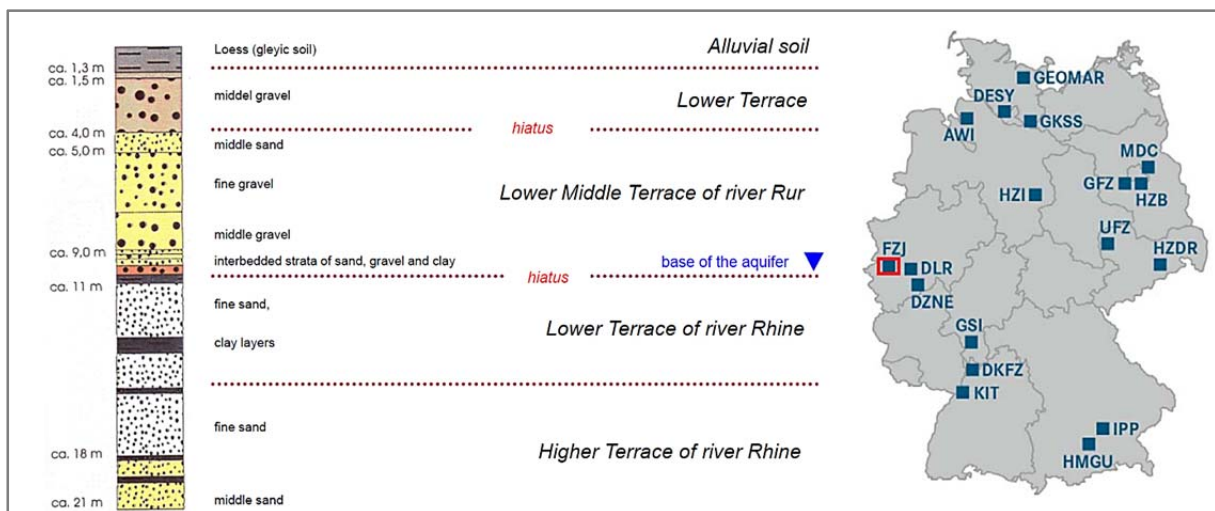


Figure 5- 2 Localisation du site d'étude de Krauthausen et séquence stratigraphique de l'aquifère, centre de recherche Jülich (van der Kruk et al., 2017).

Pour une meilleure surveillance de la distribution spatiale et temporelle des traceurs, 68 puits d'observation de 5 cm de diamètre ont été construits. Les expériences de suivi de traceurs ont été menées entre 11 et 13 m de profondeur (85-87 m NGF, fig. 5-3) et la profondeur à laquelle les traceurs ont été injectés est comprise entre 6 et 7 m. L'instrumentation a été faite sur 58 puits avec des échantillonneurs installés dans les

parois des puits. Pour le protocole d'injection, 120 kg de LiCl et 2 kg de l'uranine ont été dissous avec 4500 L d'eau injectés pendant 5 h. Les concentrations initiales étaient de 240 mg/L et 4100 mg/L respectivement. Pour le NaBr, la solution a été préparée avec 136 kg de soluté et 8000 L d'eau. L'injection a duré 10,8 h. Les valeurs de densités de flux ont été calculées à partir des courbes de dilution.

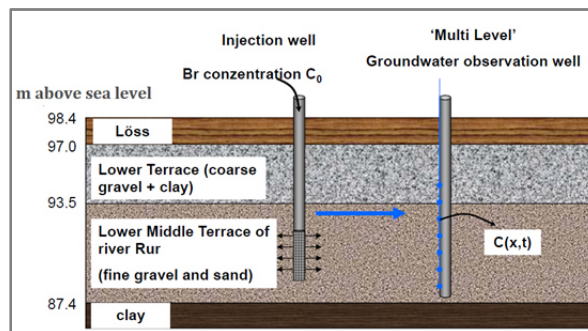


Figure 5- 3 Schéma de l'injection de traceurs (van der Kruk et al., 2017).

Selon les résultats obtenus, pour une surface expérimentale de 40 x 180 m, les valeurs de porosité moyenne pour les couches d'intérêt est d'environ 26 % avec une conductivité hydraulique moyenne de $3,8 \cdot 10^{-3}$ m/s. Le gradient hydraulique était de 0,2 % et la densité de flux moyenne de 0,65 m/j. La profondeur de la nappe a été trouvée entre 2,5 m en été et 1 m en saison hivernale.

Par rapport aux expériences de traçage, une partie de la masse du NaBr a été transportée au-delà du site d'étude (fig. 5-4-a). Sur la figure 5-4-b, on observe que le volume de bromure injecté a plongé partiellement par rapport à la profondeur d'injection (décalage d'environ 40 cm) à cause de la différence de masse volumique entre la solution injectée et l'eau de l'aquifère (1,5 % plus grande).

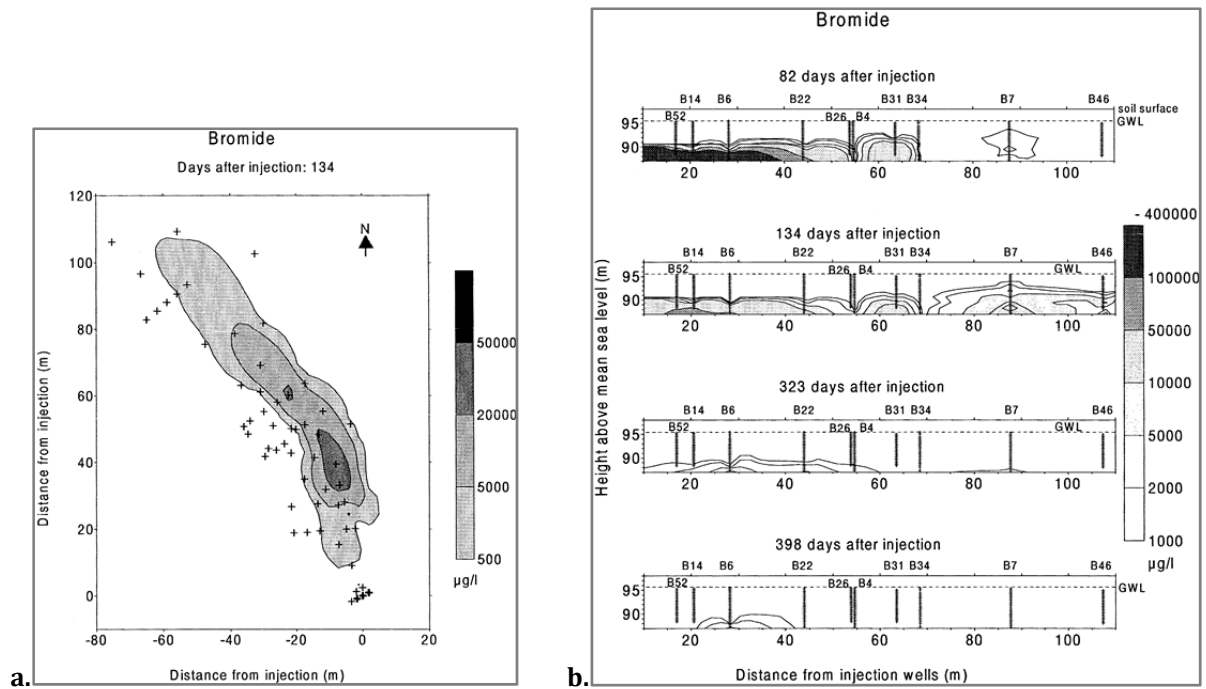


Figure 5- 4 Contour des concentrations de bromure : a) horizontal, 134 jours après l'injection, b) vertical, 398 jours après l'injection (Vereecken et al., 2000).

La récupération de la masse de bromure a montré une diminution systématique de celle-ci (fig. 5-5). Elle a été quasiment constante pendant 110 jours après l'injection. L'uranine et le lithium ont présenté une diminution de masse encore plus importante en fonction du temps. Ce phénomène avait été prévu, car il existe un phénomène de sorption du lithium et de l'uranine par les sédiments de l'aquifère. Cela est confirmé également par les analyses des prélèvements réalisés avec les échantillonneurs.

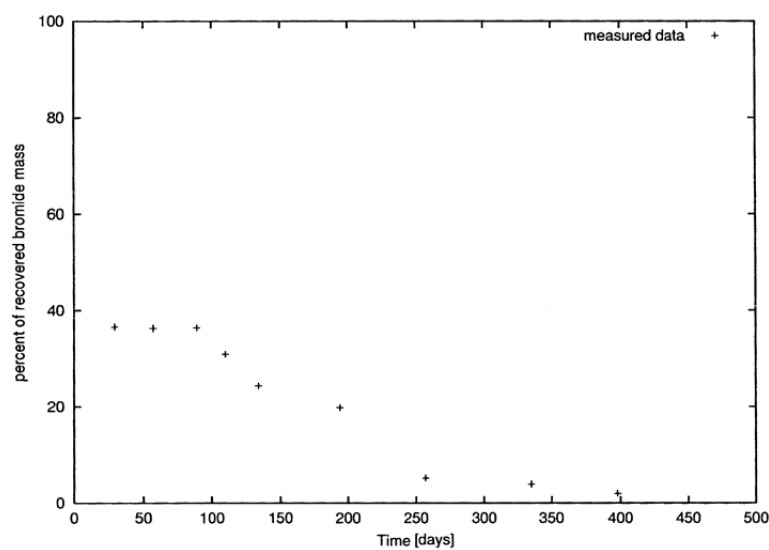


Figure 5- 5 Variation de la récupération massique du bromure en fonction du temps (Vereecken et al., 2000).

Les valeurs de densité de flux (« Darcian velocity ») suivent une distribution log-normale. De plus, les eaux souterraines ont montré une direction dominante d'écoulement verticale. Les analyses de concentration en traceurs ont démontré que la sorption de l'uranine et du lithium pouvait être décrite avec l'isotherme de Freundlich. La dispersion longitudinale mesurée *in situ* est 3,64 m et la valeur calculée était de 7,2 m.

5.3. Migration des nitrates dans la zone non saturée de la nappe de la craie dans le nord de la France.

A l'échelle nationale, la craie a été un sujet d'étude étant donné les ressources en eau souterraine qui sont stockées par ce type de réservoir calcaire. En France, la formation de la craie couvre la plus grande surface d'affleurement du bassin Seine-Normandie. Elle est délimitée entre un complexe argileux à sa base et les séries complexes argilo-sableuses de l'Eocène inférieur à son toit. Le réservoir de la craie (système du Crétacé Supérieur) est constitué par trois faciès principaux pour former une puissante assise crayeuse de 100 m d'épaisseur: i) craie du Turonien et Sénonien, ii) craie marneuse du Turonien inférieur et iii) craie marneuse, sableuse et glauconieuse du Cénomanién (Fiche BD-LISA, Craie Normande et Picarde, 2012). Au nord de la France, les trois grands secteurs hydrogéologiques sont : la craie normande et picarde, la craie champenoise et la craie de Bourgogne et du Gâtinais.

La craie est un dépôt sédimentaire marin formé quasi-exclusivement par l'accumulation d'organismes carbonatés microscopiques (3 à 5 μm) appelées coccolites, sur le fond d'une mer moyennement profonde (150 m). Ces débris étant stables à basse température, la porosité de la craie sera préservée s'ils ne recristallisent pas. La craie est un matériau à basse perméabilité.

Dans le bassin Artois-Picardie, la craie subit, après le Sénonien, une émergence qui a conduit à une période d'altération et de dissolution; on parle alors de pseudo-karsts. Dans l'aquifère, on observe une double porosité, avec une porosité matricielle et une porosité de fissure (Lacherez-Bastin, 2005). La transmissivité de l'aquifère dépend de la fissuration. On peut observer celle-ci avec la réalisation de diagraphies (fig. 5-6). On constate, dans ces essais, que la craie devient moins productrice d'eau en profondeur. On

peut dire que la craie devient compacte à partir de 40 m de profondeur (Lacherez-Bastin, 2005).

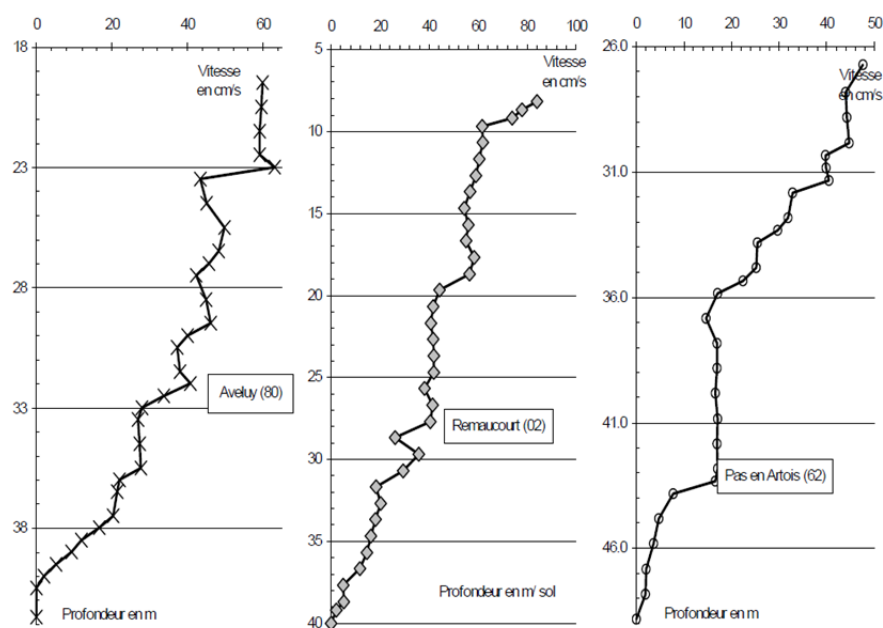


Figure 5- 6 Diagrammes du micromoulinet de forages réalisées au sein de l'aquifère crayeux dans le bassin Artois Picardie (Lacherez-Bastin, 2005)

Plusieurs campagnes de sondages *in situ* ont été faites dans le bassin Artois-Picardie, afin de suivre et comprendre la migration d'un front de pollution azoté au sein de la ZNS crayeuse. Les principaux sites de prélèvement sont présentés dans la figure 5-7. Des prélèvements d'échantillons de la ZNS ont été réalisés pour mesurer la concentration en azote ou en nitrate de l'eau interstitielle à différents profondeurs.

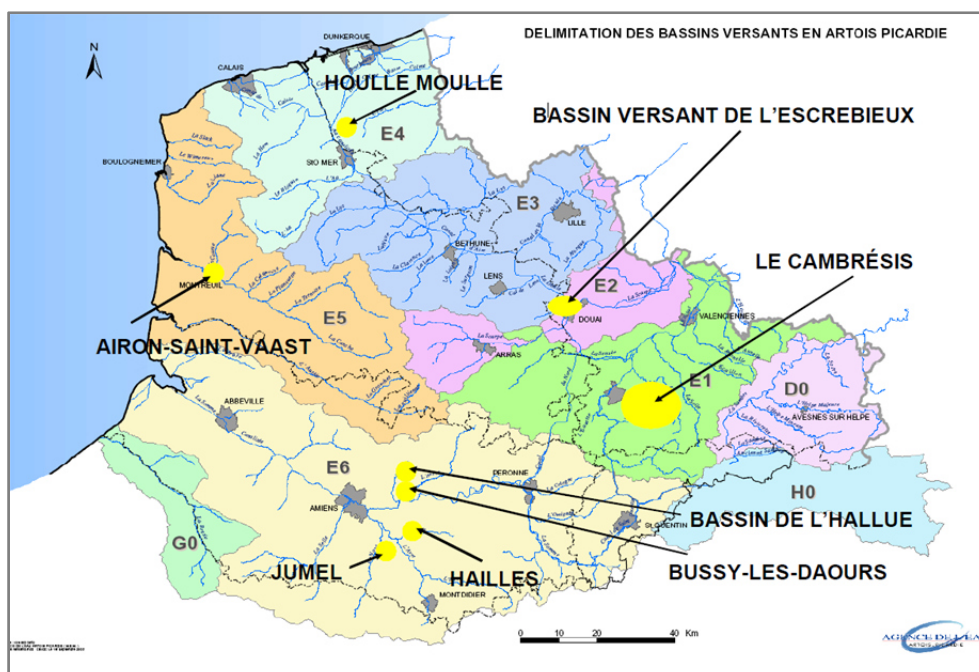


Figure 5- 7 Délimitation des bassins versants en Artois-Picardie. En jaune, la localisation des principaux sites de prélèvement de sol (Lacherez-Bastin, 2005).

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que le mode d'écoulement de l'eau à travers la zone non saturée crayeuse dépend exclusivement des conditions de saturation du sous-sol. En période sèche, l'écoulement se fait à 85 % par effet piston au sein de la matrice poreuse crayeuse, avec une vitesse de l'ordre de 0,6 m/an et les 15 % restants par l'intermédiaire des fissures. On entend par transfert de type piston, le mécanisme à travers lequel l'eau s'infiltre dans la porosité de la craie (40 %) et pousse vers le bas l'eau déjà présente dans la roche et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'eau de la base de la ZNS atteigne la nappe. Dans des conditions de saturation importante, l'écoulement par les fissures peut venir égaler, voire supplanter, le mode d'écoulement par effet piston. Les vitesses de migration des nitrates sont brusquement accélérées, pendant une courte période, au droit de la zone fissurée.

Pour toutes les campagnes de sondage réalisées au niveau de la ZNS crayeuse, les vitesses de migration des nitrates sont de l'ordre de 0,8 à 1 m/an (Lacherez-Bastin, 2005). Des valeurs obtenues pendant les années précédentes sont présentées dans le tableau 5-1.

Tableau 5- 1 Vitesses de migration des nitrates au sein de la ZNS crayeuse du bassin Artois-Picarde (Lacherez-Bastin, 2005).

Site	Année	Vitesse moyenne	Pluie efficace
ESCREBIEUX	1996	1.0 m/an	128 mm
AIRON-SAINT-VAAST	1997	1.0 à 1.5 m/an	109 mm
CAMBRESIS :	Octobre 1999		335 mm
Plateau		0.4 à 0.6 m/an	
Versant		0.75 à 1.5 m/an	
Vallée		1.3 m/an	

La vitesse moyenne présentée dans le tableau évolue essentiellement en fonction de l'épaisseur et du type de recouvrement au-dessus de la craie. Sous un recouvrement argileux de l'ordre de 5 m d'épaisseur, la vitesse moyenne d'avancement du front de pollution est de l'ordre de 0,6 m/an. Sous un recouvrement limoneux, la vitesse moyenne est de l'ordre de 0,8 à 1 m/an. Sous un recouvrement sableux, on atteint des vitesses de 1,25 m/an.

Parmi les résultats de la modélisation des concentrations de nitrates, Lacherez-Bastin (2005) a montré que la restitution des teneurs en nitrates de la nappe de la craie en 1981 (fig. 5-8-a) indique que la charge principale en azote provient de l'amont (sud-ouest) de la nappe par rapport à la faille de Marqueffles, et du bassin versant de l'Escrebieux, lequel est très fissuré. Les perméabilités verticales y sont très importantes et toute l'eau s'infiltré. C'est en effet là où l'on observe les plus fortes teneurs en nitrates dans la nappe (fig. 5-8).

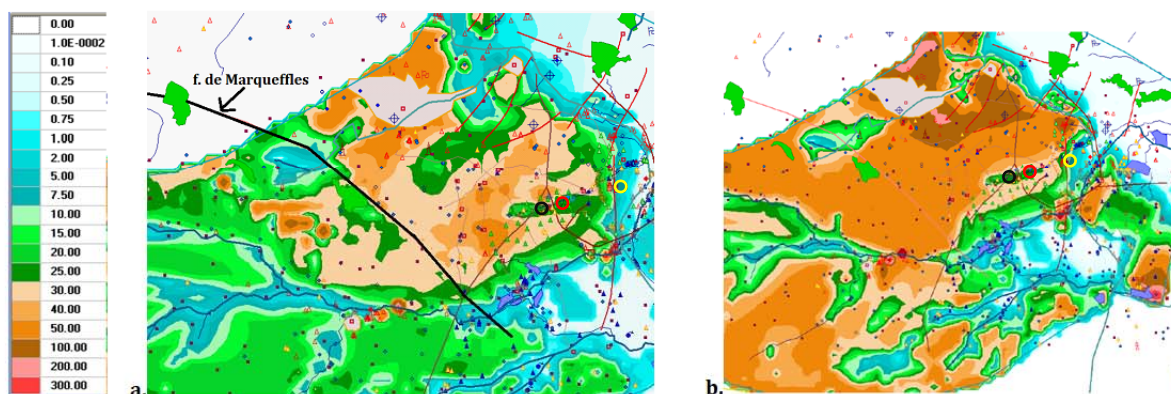


Figure 5- 8 Concentration en nitrates de la nappe de la craie, calculées en mg/L simulée en a) janvier 1981 et en b) février 1988, au droit du bassin versant de l'Escrebieux. Le cercle noir représente le champ captant de Quiery la Motte, le cercle rouge, le champ d'Esquerchin et le cercle jaune représente le recouvrement des argiles de Louvil

On y observe de fortes transmissivités comprises entre 140 m²/h et 250 m²/h (Lacherez-Bastin, 2005).

La restitution des taux de nitrates pour février 1988 (fig. 5-8-b) indique qu'en amont de la faille de Marqueffles, les concentrations en nitrates dans la nappe sont encore élevées. Au droit des champs captants de Quiery la Motte et d'Esquerchin, les teneurs sont faibles. Le phénomène de dénitrification naturelle au sein de la nappe de la craie en aval (direction de l'écoulement SO-NE) de la vallée de l'Escrebieux est bien restitué, sous le recouvrement argileux de Louvil (au nord-est de la faille de Marqueffles).

5.4. Etude du fonctionnement hydrique des sols et de la ZNS et étude de la pollution par les nitrates d'origine agricole dans l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain).

La dégradation croissante de la qualité des eaux de la nappe phréatique de Beauce a conduit à l'élaboration de plusieurs programmes de lutte contre les pollutions d'origine agricole. Le nitrate constitue l'un des principaux facteurs de détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe de Beauce. De nombreux organismes ont participé aux programmes concernant la région naturelle dite «Petite Beauce», très sensible à la pollution diffuse d'origine agricole (Ould Mohamed, 1995).

La région naturelle de la Petite Beauce est située dans la partie occidentale des calcaires de Beauce (fig. 5-9), qui constitue une formation palino-lacustre, et s'étend sur près de 10000 Km² (Lorain, 1973 d'après Ould Mohamed, 1995). La Petite Beauce est délimitée au sud par le Val de Loire et la forêt d'Orléans, au nord par la Beauce Chartraine et la Grande Beauce, à l'ouest par le Faux-Perche et la vallée du Loir et à l'est par l'Orléanais et le Val de Loire. C'est une région essentiellement agricole, caractérisée par un relief plat. En Petite Beauce, le calcaire aquitain est recouvert par une formation superficielle quaternaire limono-argileuse. Le calcaire de Beauce a une épaisseur moyenne de 40 m, mais qui peut aller jusqu'à une centaine de mètres au centre du bassin (Lorain, 1973 d'après Ould Mohamed, 1995).



Figure 5- 9 Situation géographique de la Petite Beauce (Ould Mohamed, 1995).

Un ensemble de dispositifs de mesures pluviométriques, tensiométriques et d'humidité (méthodes neutronique et capacitive) a été mis en place durant trois périodes hivernales successives: 1991-92, 1992-93 et 1993-94. Des méthodes d'analyse chimique ont été aussi utilisées à l'aide de plaques lysimétriques installées dans le sol.

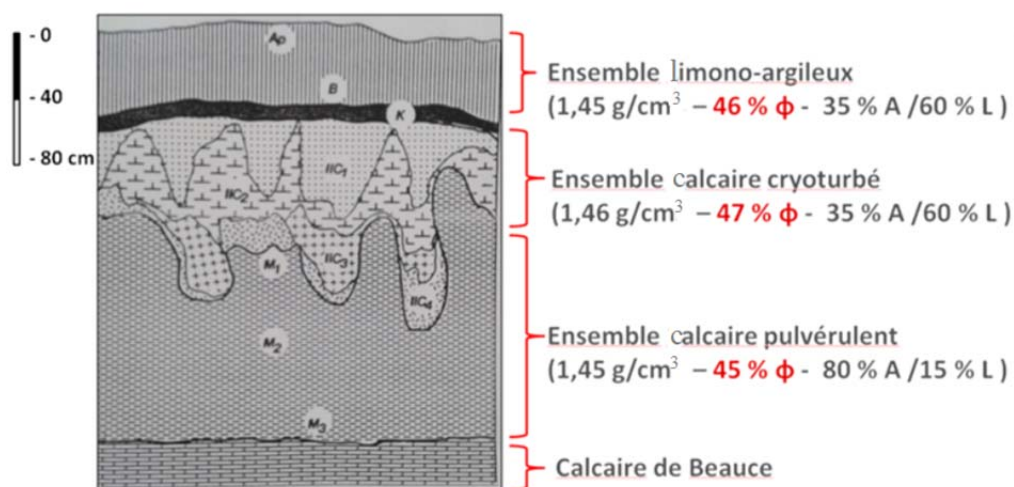


Figure 5- 10 Coupe pédologique d'un sol à Villamblain au lieu-dit les Sapins Dousset. Φ représente la porosité totale (Ould Mohamed, 1995).

L'étude de Ould Mohamed (1995) montre qu'en période hivernale, le drainage constitue le régime d'écoulement principal au niveau des trois grands ensembles étudiés (ensemble limono-argileux supérieur, de 0 à 65 cm, ensemble calcaire cryoturbé intermédiaire, de 65 à 170 cm et ensemble calcaire pulvérulent, de 170 à 260 cm) (fig. 5-10). Sur la base des chroniques obtenues, la composante principale du drainage est verticale. L'étude de ces chroniques a permis de constater que les transferts d'eau

s'effectuent de façon rapide au niveau de ces trois grands ensembles avec des valeurs moyennes de K_{sat} de $2,97.10^{-6}$ m/s pour l'ensemble limono-argileux et de $4,77.10^{-6}$ m/s pour l'ensemble calcaire pulvérulent. Les teneurs en eau moyennes à saturation respectives sont 0,435 et 0,354. L'étude des transferts d'eau dans les matériaux cryoturbés est difficile à réaliser du fait de l'hétérogénéité des matériaux. Le tableau suivant est un récapitulatif des mesures au cours de trois périodes.

Tableau 5- 2 Présentation des quantités d'eau drainées à la base du limon argileux et de tout le système. T1, T2 et T3 représentent les tubes d'accès à la sonde à neutrons et capa. la méthode capacitive (Ould Mohamed, 1995).

Date	Pluviométrie	Irrigation	Drainage à la base du limon argileux (mm)				Drainage à la base du calcaire pulvérulent (mm)		
			T1	T2	T3	capa.	T1	T2	T3
05/02 au 05/05/92	61	93	65	55	60	48	28	22	30
01/12/92 au 20/05/93	270	-	128	135	-	112	65	68	-
01/12/93 au 31/05/94	357	-	167	170	155	180	125	130	120

Le bilan hydrique montre qu'environ 50 % de la lame d'eau pluviométrique totale s'infiltre à travers le sol et est donc susceptible d'alimenter la nappe phréatique. Toutefois, seuls 40 % de la lame pluviométrique totale s'infiltre réellement à la base des trois ensembles d'horizons, 10 % étant retenus au niveau des matériaux cryoturbés (tableau 5-3). Lors du suivi du période 1991-92, il n'y a pas eu de recharge de la nappe étant donné la pluviométrie très déficitaire enregistrée cette année-là.

Tableau 5- 3 Contribution de la lame d'eau infiltrée à la recharge de la nappe (Ould Mohamed, 1995).

Suivi	Lame d'eau pluviométrique (mm)	Lame d'eau infiltrée à la base (mm)		Lame d'eau correspondant à la recharge de la nappe mesurée
		du sol	des matériaux cryoturbés	
92-93	270	128	65	55
93-94	357	170	130	140

Schnebelen (2000) a étudié l'impact des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates de l'aquifère des Calcaires de Beauce à Villamblain. Les travaux réalisés comprenaient trois étapes : i) simulation des flux d'eaux et de nitrates percolant à la base du sol, ii) analyse et simulation de l'évolution des teneurs en nitrates dans la nappe

et iii) comparaison de la répartition des teneurs en nitrates à la base du sol et dans la nappe.

L'évolution spatiale et temporelle des teneurs en nitrates dans l'aquifère a été abordée à partir de trois types de forages présents sur le secteur d'étude : i) les forages d'adduction d'eau potable (AEP), qui ont une profondeur voisine de 50 mètres et une hauteur crépinée d'une vingtaine de mètres, ii) les piézomètres, nettement moins profonds que les forages AEP (environ 25 mètres), avec une hauteur crépinée de quelques mètres, iii) les forages agricoles utilisés pour l'irrigation printanière et estivale des cultures céréalières, avec les mêmes caractéristiques techniques que les forages AEP (profondeur et hauteur crépinée).

Sur la période d'étude (1994-1999), la quantité d'azote lessivée et la teneur en nitrates des eaux drainées mesurées à la base des cases lysimétriques du site expérimental de Villamblain sont incontestablement plus faibles pour les cases lysimétriques situées à l'intérieur du site expérimental (sous gestion d'azote raisonnée) que pour les cases situées à l'extérieur du site expérimental (hors gestion d'azote raisonnée). Les moyennes annuelles de quantité d'azote lessivée et de teneur en nitrates des eaux drainées sont respectivement 12 kg N.ha⁻¹ et 45 mg.L⁻¹ pour les cases situées à l'intérieur du site expérimental et de 40 Kg N.ha⁻¹ et 122 mg.L⁻¹ pour les cases situées à l'extérieur du site expérimental. Ces premiers résultats montrent que la gestion d'azote raisonnée (fertilisation raisonnée et gestion de l'interculture) mise en œuvre à l'intérieur du site expérimental de Villamblain améliore notablement la qualité des eaux de réalimentation de la nappe.

Selon les résultats obtenus d'après les prélèvements d'eau dans les forages agricoles (fig. 5-11), il existe une influence prépondérante des périodes de production (irrigation) et d'arrêt des forages agricoles sur l'évolution des teneurs en nitrates mesurées en différents points de l'aquifère. Des estimations des teneurs en nitrates dans les différents forages dans la nappe ont été obtenues: calcaire de Pithiviers 28-85 mg.L⁻¹, calcaire d'Etampes 20-62 mg.L⁻¹, calcaire de Morancez 22-48 mg.L⁻¹. L'hétérogénéité de l'aquifère a été aussi mise en évidence par le fait qu'il existe des zones d'écoulements latéraux au niveau de la partie inférieure du Calcaire d'Etampes, des zones de perte d'eau dans la partie supérieure du Calcaire de Pithiviers et une circulation ascendante locale entre ces deux zones.

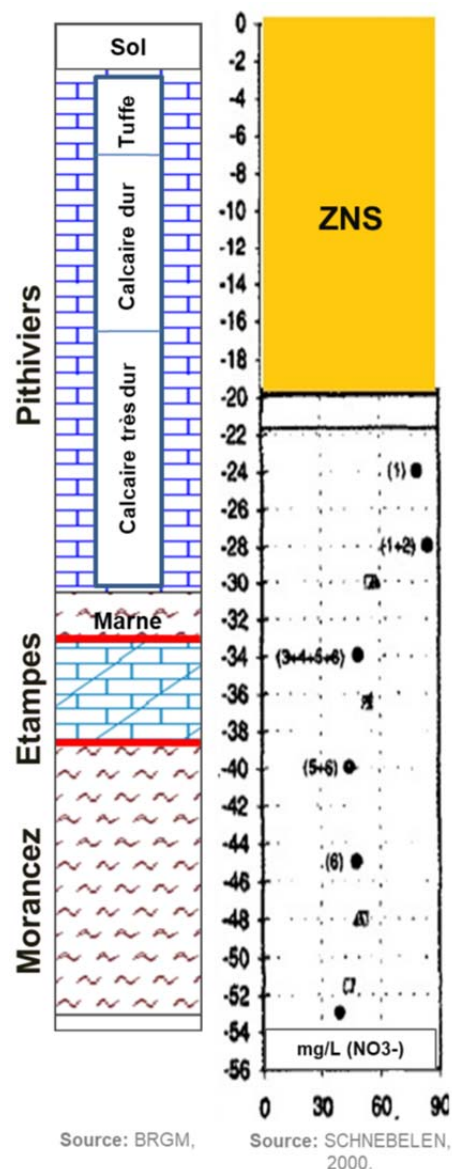


Figure 5- 11 Concentration en nitrate dans l'aquifère de Beauce en fonction de la profondeur (Schnebelen, 2000).

La plupart des cas d'études montrés ci-dessus concernent le suivi ou le traçage des polluants dans la ZNS et au niveau de la nappe. Les mesures des propriétés hydriques de matériaux non saturés sont rares et difficiles à réaliser sur le terrain à cause de la difficulté d'accès à la zone d'intérêt. Le fonctionnement hydrique de la ZNS de l'aquifère des Calcaire de Beauce n'est pas bien connu. Cela justifie l'intérêt de caractériser chaque couche lithologique impliquée dans le transfert de l'eau et des polluants pour quantifier leurs propriétés hydriques en condition non saturée.

PARTIE II:

MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 6: PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

6.1. Description générale de l'aquifère des calcaires de Beauce

L'aquifère des Calcaires de Beauce, situé au nord de la Loire, s'étend sur près de 9000 km² répartis sur les deux bassins versants de la Seine et de la Loire, et sur les deux régions Ile-de-France et Centre-Val de Loire. Il constitue l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine en France. Il alimente les affluents de la Loire, du Loir, de l'Essonne, de la Seine et du Loing et assure une partie notable de leur débit d'étiage. Au niveau économique, cet aquifère représente un enjeu majeur. Sur la plus grande partie de son étendue, il constitue en effet la principale ressource en eau, tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation agricole (BRGM, 1997).

Le système aquifère se développe essentiellement dans un ensemble de formations lacustres à dominante calcaire qui se sont déposées durant le Tertiaire, depuis l'Eocène jusqu'à l'Aquitainien (miocène supérieur). Le substratum de l'aquifère est constitué par des formations détritiques du Sparnacien et par la formation à argiles à silex qui recouvrent la Craie du Sénonien-Turonien (Desprez et Mégrien, 1975 d'après Schnebelen, 2000).

La figure 6-1 présente les limites géographiques de l'aquifère :

- au sud, la Loire, qui sépare les systèmes aquifères de Beauce et de Sologne,
- à l'ouest, le Loir, l'Eure et la limite d'affleurement de l'argile à silex qui sépare les deux cours d'eau,
- au nord, la Drouette (affluent de l'Eure), la Remarde et l'Orge (affluent de la Seine), qui correspondent aux affleurements des argiles vertes et de la Craie,
- au nord-est et à l'est, la Seine et le Loing,
- au sud-est, la limite d'affleurement des formations détritiques de l'Eocène.

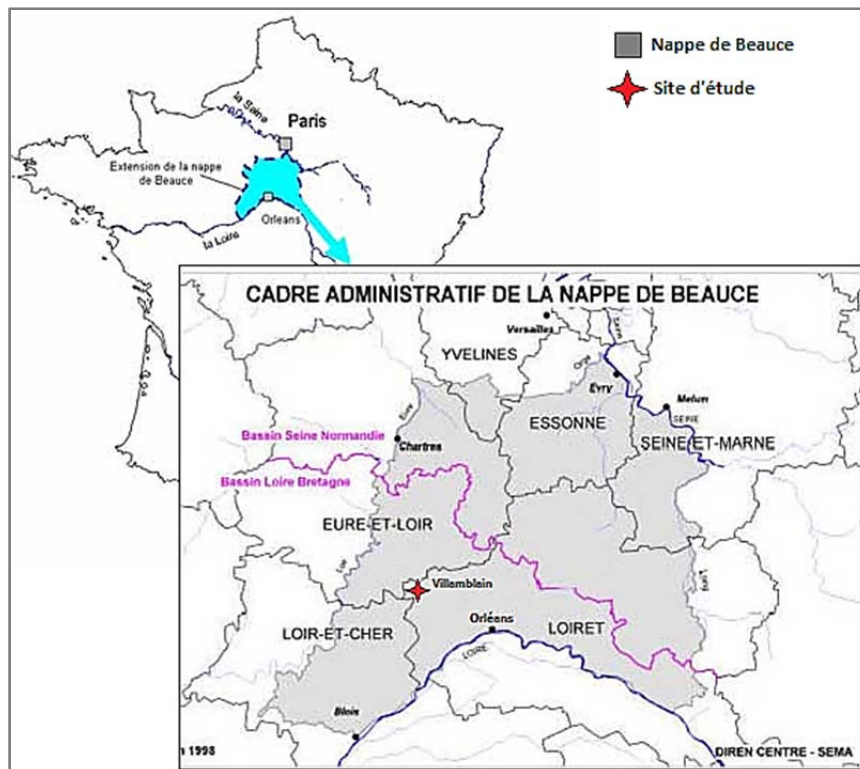


Figure 6- 1 Limites du système aquifère des Calcaires de Beauce (DIREN Centre, 2000).

Le site d'intérêt choisi pour l'étude des propriétés de transfert de la ZNS se trouve dans la commune des Villamblain, dans le département de Loiret, juste à côté des limites départementales de l'Eure-et-Loir et du Loir-et-Cher (fig. 6-1). Le site d'étude est une parcelle agricole appelée « les Hôtels » située dans la commune de Villamblain.

Villamblain se caractérise par une forte activité agricole. La principale source d'eau est la nappe de Beauce d'où les prélèvements sont faits à partir de forages.

Le choix du site a été conditionné par plusieurs critères, tels que hydrogéologiques, pédologiques et agronomiques.

6.2. Cadre géologique

6.2.1. Stratigraphie

A la fin du cycle stampien (ou cycle oligocène), la mer abandonne définitivement le Bassin de Paris, laissant derrière elle une région de marais qui conservera son caractère palustre pendant l'Aquitaniens (Pomerol et al., 1968 d'après Trautmann, 1974).

Cet étage qui, dans le bassin d'Aquitaine, marque le début d'une transgression, est représenté dans le Sud du Bassin de Paris par la partie terminale d'une série de dépôts

lacustres qui débute à l'Eocène moyen. La formation lacustre repose, au Nord de la Beauce, sur les sables stampiens ; elle est discordante sur le Lutétien marno-calcaire et sur l'Yprésien en pays chartrain, et sur des assises crétacées dans tout le reste du bassin.

Les dépôts détritiques du Burdigalien (Miocène) ravinent les formations du Groupe de Beauce. Pourtant, au centre du bassin, sous la forêt d'Orléans et à son extrémité nord-ouest, il est difficile d'établir une coupure nette entre les faciès marneux de la formation lacustre et les marnes de l'Orléanais burdigaliennes. Il semble que, localement et au début de l'épisode burdigalien, les conditions de sédimentation n'aient changé que progressivement (Trautmann, 1974).

Homogène à l'échelle du bassin, la sédimentation lacustre de Beauce révèle dans le détail une hétérogénéité due à l'absence de courants dominants stables dans le temps, à la faible épaisseur de la tranche d'eau et, à une succession de cloisonnements du bassin en plans d'eau n'ayant pratiquement pas de relations entre eux et subissant des inondations plus ou moins périodiques (Trautmann, 1974, après Menillet, 1974). Par conséquent, les phénomènes de précipitation chimique ont toujours eu une extension restreinte et les apports détritiques locaux proviennent des abords immédiats du domaine lacustre.

6.2.2. Lithologie

Le calcaire de Beauce a une épaisseur moyenne de 40 m, mais qui peut aller jusqu'à une centaine de mètres au centre du bassin. Trautmann (1974) a regroupé les lithofaciès en 8 types généraux pour simplifier les données très hétérogènes:

- Calcaires indifférenciés (durs ou tendres),
- Calcaires durs,
- Calcaires durs fissurés,
- Calcaires tendres,
- Marnes (ou calcaires crayeux dans la plupart des cas),
- Argiles,
- Sables,
- Argiles et marnes en alternance.

Menillet (1980) distingue quatre ensembles de faciès pouvant être associés de diverses manières (Ould Mohamed, 1995):

- des faciès calcaires à structure homogène, dont certains sont constitués de calcaires durs sublithographiques, d'autres sont des calcaires crayeux, friables et très poreux. On y distingue aussi des calcaires tendres et friables, souvent dit « pulvérulents », et que de nombreux auteurs ont qualifié de marnes, tant ils s'en rapprochent par l'aspect et la couleur, malgré leur teneur en carbonates avoisinant 90 %.
- des faciès calcaires à structure hétérogène, parmi lesquels on distingue des calcaires graveleux, des calcaires bréchiques et des calcaires rubanés, qui constituent des niveaux peu épais mais relativement continus.
- des faciès à dominante siliceuse avec la présence de calcaire siliceux ou de meulières bréchiques ou vacuolaires.
- enfin, des faciès argileux, intercalés entre les bancs calcaires.

Dans la zone d'étude (fig. 6-1), on distingue, au-dessus de la Craie, douze unités lithologiques. Ce sont, dans l'ordre stratigraphique (du haut en bas, i.e. du plus récent au plus ancien, fig. 6-2):

1. Les formations argilo-sableuses du Burdigalien
2. Le calcaire de l'Orléanais
3. Les marnes de Blamont
4. Le calcaire de Pithiviers
5. La molasse du Gâtinais
6. Le calcaire d'Etampes
7. Les sables de Fontainebleau
8. Les marnes vertes à huîtres
9. Le calcaire de Brie
10. Les argiles vertes et les marnes supra-gypseuses
11. Les calcaires Éocènes
12. Les argiles à silex et les formations détritiques éocènes.

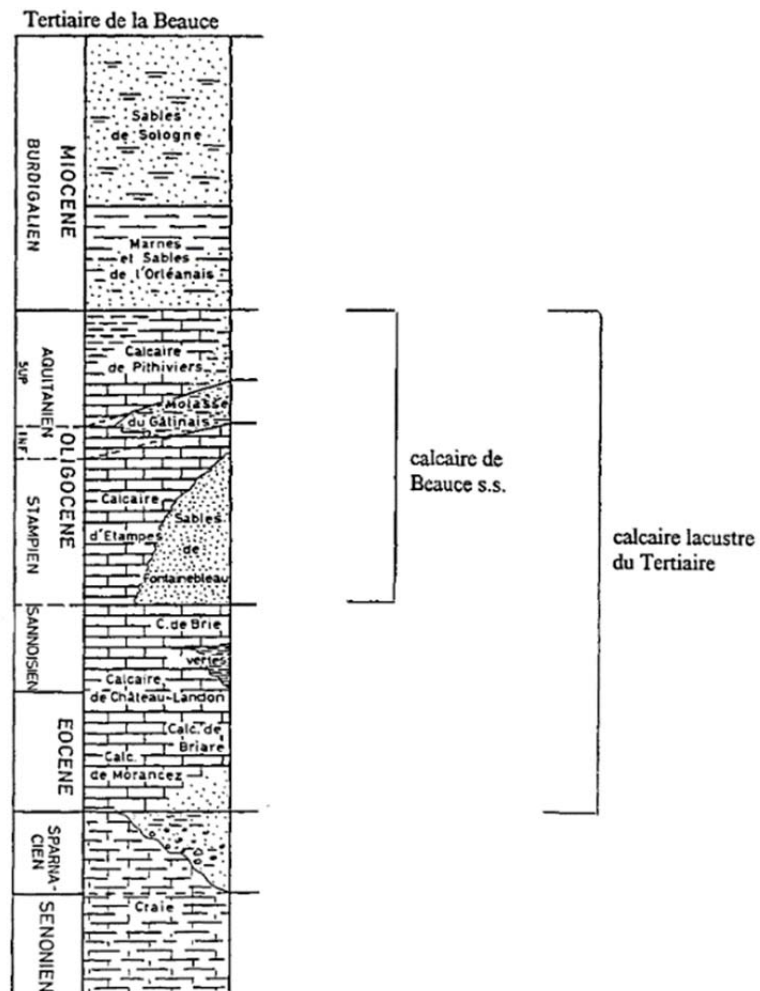
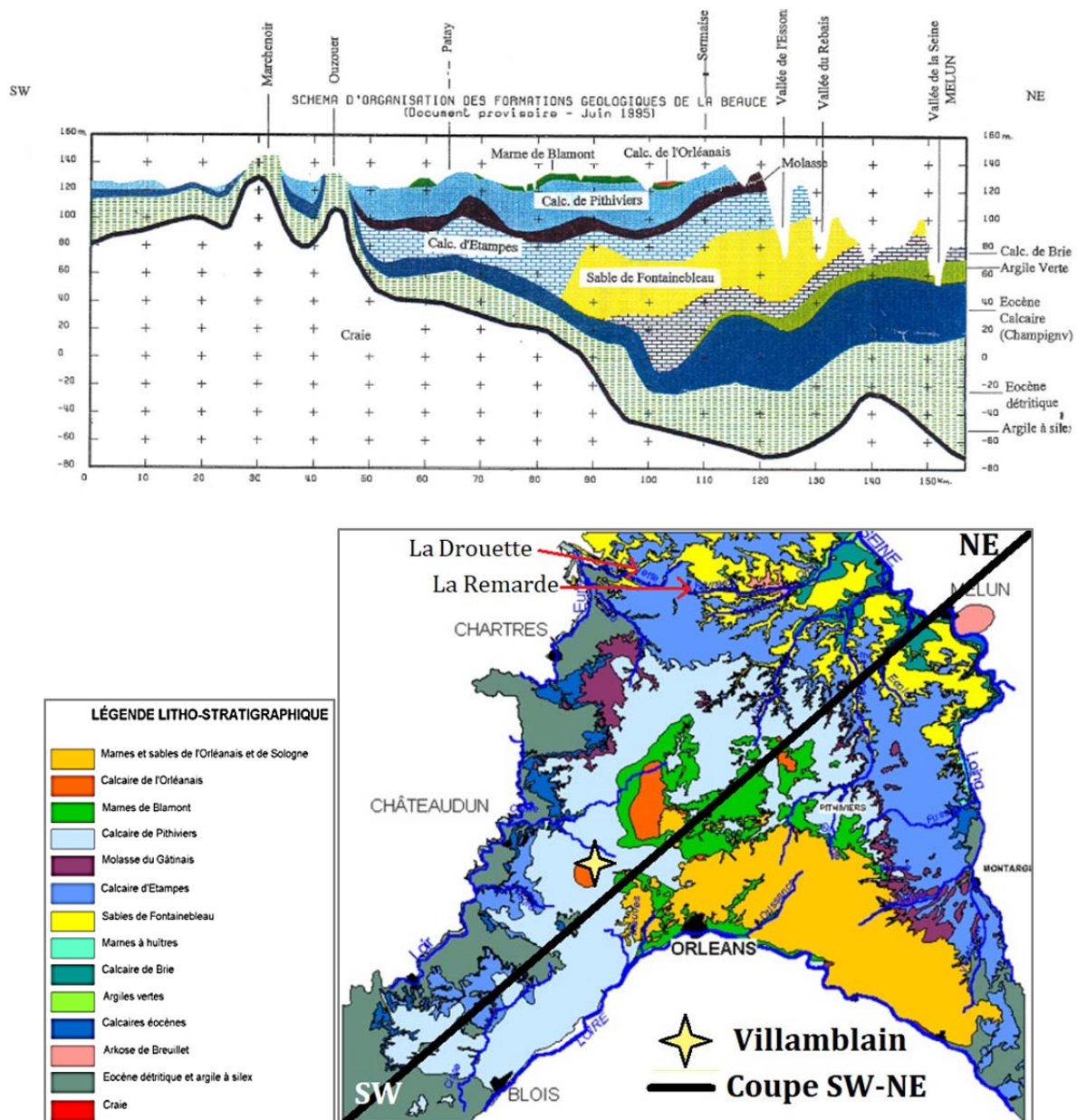


Figure 6- 2 Colonne lithostratigraphique du système de Beauce (BRGM, 1995).

Après le dépôt des formations éocènes (fig. 6-2), dont la lithologie est très changeante et qui correspondent aussi bien à des environnements marins que continentaux, les calcaires lacustres oligocènes viennent en transgression du nord-ouest au sud-est sur le substratum éocène. Leur succession est interrompue par des intercalations de marnes d'origine lagunaire ou continentale plus ou moins continues ainsi que par le prisme transgressif des sables littoraux de Fontainebleau. Cette succession-type n'est pas complète partout et varie selon l'extension des différentes unités dont la stratigraphie est complexe. La carte lithostratigraphique liée à cette coupe est présentée dans la figure 6-3.



6.3. Qualité des eaux de l'aquifère de Beauce

Plusieurs études sur l'aquifère de Beauce ont été menées dans la région Centre-Val de Loire depuis les années 80. En 1987, par exemple, le BRGM a effectué une étude de modélisation et de prévision de l'évolution des teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce (fig. 6-4). Les résultats des simulations ont montré la présence de deux zones assez étendues, où les teneurs ont augmenté de plus de 4 mg/L entre les années 1981 et 1984, l'une située à l'Ouest de la route Orléans-Chartres, l'autre à l'Est de Pithiviers. Au sein de la première de ces zones, des secteurs aux augmentations plus

fortes (de 8 à 12 mg/L ou plus de 12 mg/L) émergent, au Sud de Châteaudun en particulier (Seguin, 1987).

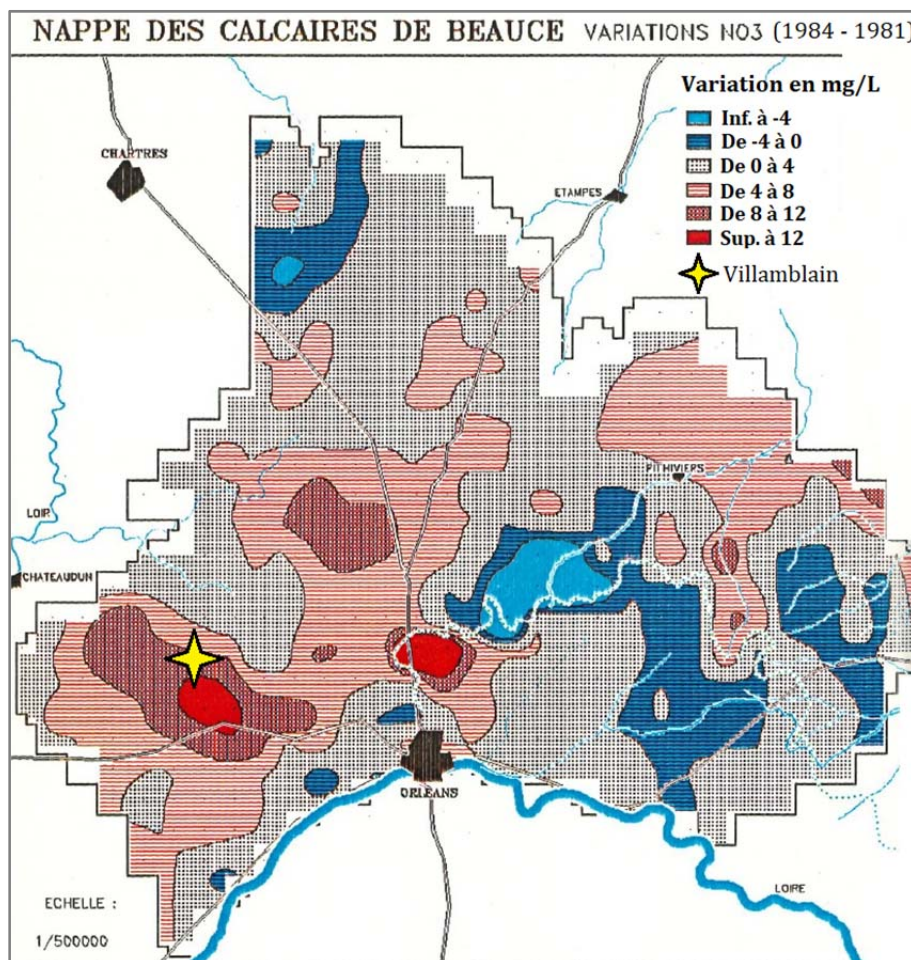


Figure 6- 4 Carte de l'évolution des teneurs en nitrates obtenue par différences des cartes de 1984 et 1981 (Seguin, 1987).

En 1990, la communauté européenne a élaboré des mesures environnementales de gestion de la pollution diffuse par les nitrates, qui se sont traduites à l'échelle nationale par la mise en place de la directive « Nitrates ». Dans le cadre de cette directive, un programme d'action a été mis en place dans tous les départements de la région Centre-Val de Loire.

6.4. Cadre hydrogéologique

Le système aquifère de Beauce est alimenté par infiltration directe ou indirecte. Une carte piézométrique a été réalisée en 1994, en période de basses eaux, à partir de 1500 points de mesure (BRGM, 1995). La carte montre l'existence de deux nappes :

- la nappe principale, essentiellement renfermée dans la série de l'Oligocène-Miocène, qui recouvre l'ensemble de la Beauce (fig. 6-3),

- la deuxième nappe correspond à la nappe inférieure de l'Éocène, au nord-est, qui est séparée du réservoir principal par des marnes et des argiles vertes (figs. 6-2 et 6-3).

La piézométrie de la nappe principale culmine au nord de la structure aquifère (fig. 6-3-b), entre les vallées de la Drouette (affluent de l'Eure) et de la Remarde (affluent de l'Orge). L'altitude de ce dôme est de 148,7 m. L'ensemble de la nappe principale est drainé radialement par les cours d'eaux des bassins de la Seine (50 m à Melun) et de la Loire (90 m à Orléans).

6.4.1. Caractéristiques hydrodynamiques

Le tableau 6-1 présente les valeurs estimées des transmissivités des formations obtenues à partir des débits spécifiques des forages captant ces formations (Martin et al., 1999 d'après Schnebelen, 2000).

Tableau 6- 1 Valeurs moyennes des transmissivités des formations aquifères de Beauce (Martin et al., 1999 d'après Schnebelen, 2000).

Niveau géologique	Nombre de forages utilisés	Transmissivité moyenne ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)	Epaisseur moyenne (m)	Perméabilité moyenne ($\text{m}.\text{s}^{-1}$)
Craie	36	10^{-3}	-	-
Calcaire éocène	80	10^{-2}	25,2	4.10^{-4}
Calcaire de Brie	17	10^{-2}	10,2	10.10^{-4}
Sables de Fontainebleau	11	10^{-3}	30,3	$0,3.10^{-4}$
Calcaire d'Etampes	92	10^{-2}	23,6	4.10^{-4}
Calcaire de Pithiviers	59	10^{-2}	18,0	6.10^{-4}

De façon générale, les transmissivités des formations aquifères de Beauce sont comprises entre 10^{-3} et $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Les formations des Sables de Fontainebleau et de la Craie ont des transmissivités plus faibles d'un facteur de 10. Connaissant l'épaisseur moyenne des formations, il est possible de calculer un ordre de grandeur des perméabilités. Celles-ci sont voisines de 10^{-4} m/s . Les données recueillies n'ont pas permis d'évaluer les perméabilités des formations imperméables ou semi-perméables comme la Molasse du Gâtinais ou les Argiles vertes. Elles sont vraisemblablement comprises entre 10^{-7} et 10^{-5} m/s (Schnebelen, 2000).

6.5. Configuration de l'aquifère à Villamblain

L'épaisseur saturée de l'aquifère est comprise entre 18 et 56 m sur le secteur d'étude à Villamblain (fig. 6-5-a) (Schnebelen, 2000). L'aquifère est plus épais au sud du secteur. La zone non saturée surmontant l'aquifère a une épaisseur comprise entre 9 et 25 m. Les épaisseurs de zone non saturée les plus importantes sont localisées au nord-ouest du secteur et les plus faibles au sud.

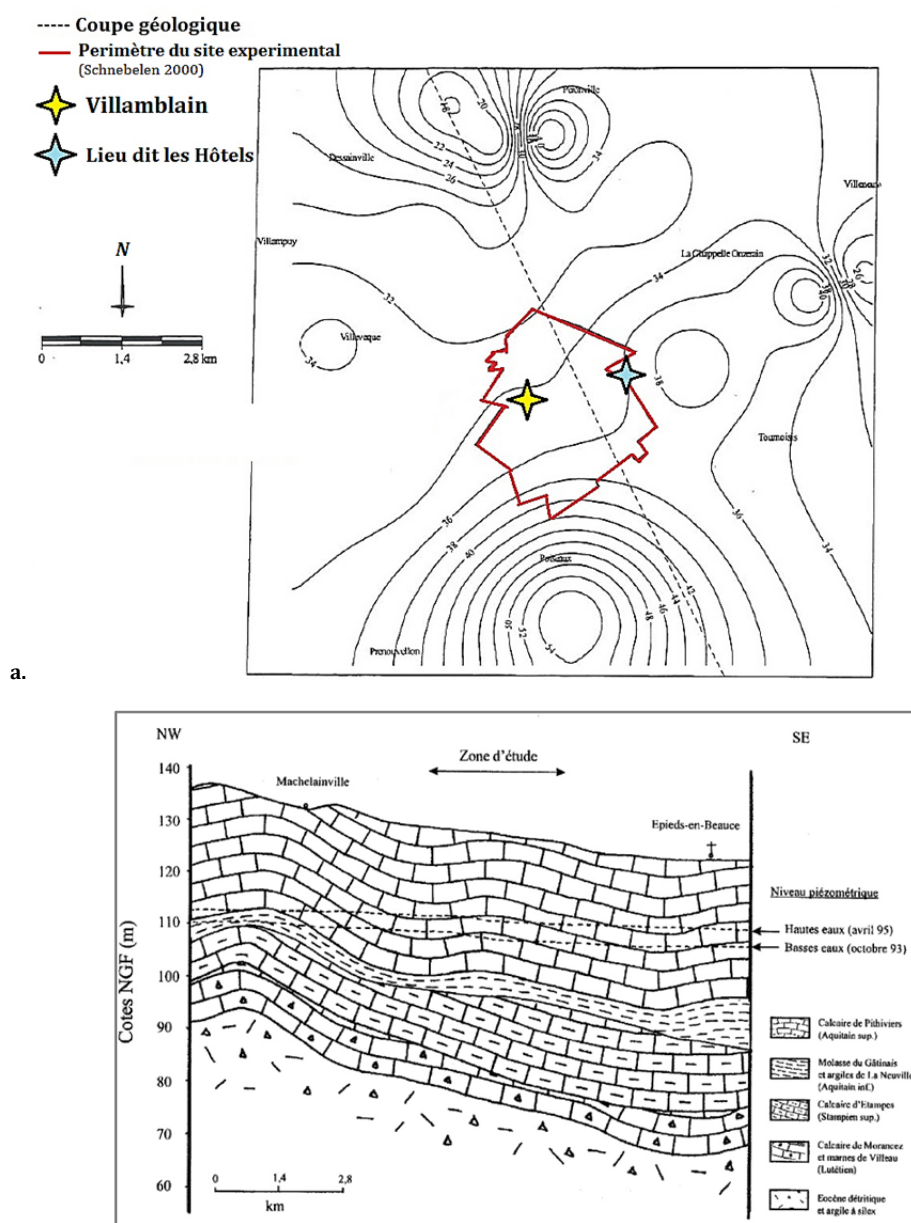


Figure 6- 5 a) Épaisseur saturée (m) de l'aquifère des Calcaires de Beauce sur le secteur de Villamblain, b) Coupe géologique NW-SE de l'aquifère des Calcaires de Beauce à Villamblain (Schnebelen, 2000).

Le substratum de l'aquifère est constitué par les formations imperméables des argiles, grès lustrés et perrons de l'Éocène détritique et des argiles à silex du Crétacé supérieur. Son épaisseur varie de 15 à 27 m (Maget, 1992 d'après Schnebelen, 2000).

La structure de l'aquifère à Villamblain est connue par une cinquantaine de forages agricoles et de forages d'alimentation en eau potable. Schnebelen (2000) décrit une séquence stratigraphique locale (fig. 6-5-b) à Villamblain qui se distingue de celle trouvée au niveau régional, car le toit de l'aquifère est situé dans la formation de Pithiviers. La formation des calcaires de Pithiviers est partiellement recouverte au sud-est du secteur par des témoins isolés des sables de l'Orléanais, datant du Burdigalien. Ces témoins, dont l'épaisseur n'excède pas 2,5 m, sont constitués d'argiles sableuses ou de sables fins. Cette formation des calcaires de Pithiviers est suivie de la formation semi-perméable de la Molasse du Gâtinais ou des Argiles de La Neuville, constituée de marnes sableuses, grumeleuses, blanches ou marron, ou d'argiles vertes. Cette formation correspond à l'Aquitaniens inférieur (Miocène inférieur). Elle semble continue sur le secteur mais d'épaisseur très variable (1-9 m). Localement, la formation perméable des calcaires d'Etampes (Oligocène inférieur) a été aussi repérée avec une épaisseur de 7 à 36 m, formée de calcaires très durs à grumeleux. La dernière formation décrite dans cette coupe est la formation perméable des calcaires de Morancez ou des Marnes de Villeau (Lutétien lacustre = Eocène moyen), constituée de calcaires marneux avec, au sommet, un liseré d'argile verte plus ou moins continu. Son épaisseur maximale est de 25 m au nord-ouest du secteur. Cette formation disparaît vers l'est. Par rapport à la coupe stratigraphique générale de la figure 6-2, les formations du calcaire de Brie, du calcaire de Château-Landon et le calcaire de Briare n'ont pas été observées. Cette alternance de 4 formations aquifères de calcaires perméables, et d'une intercalation semi-perméable de marnes sableuses ou d'argiles, identifie un aquifère multicouche.

Selon les données acquises à partir de plusieurs forages dans la zone des Hôtels à Villamblain, la ZNS est située principalement au niveau de la formation des calcaires de Pithiviers, laquelle n'excède pas les 25 m de profondeur, sachant que le niveau d'eau varie entre 15 et 22 mètres, selon la base de données piézométriques.

La figure 6-6 représente la séquence lithologique trouvée dans la localité du lieu-dit « les Hôtels » à environ 250 mètres du site d'étude (fig. 6-7). Les coordonnées WGS84 du site d'étude sont : LAT : +48,0186167 et LON : +1,5817667.

Log validé

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.00	Sol (terre végétale)	~ ~ ~	Sol	Quaternaire	128.61
4.00	Calcaire de Pithiviers		Calcaire altéré argileux	Aquitarien	125.61
7.00			Calcaire ocre, peu argileux		122.61
9.00			Calcaire blanc, dur		120.61
10.00			Calcaire blanc, un peu argileux		119.61
17.00			Calcaire blanc, dur à silex		112.61
22.00			Calcaire ocre, fin à silex		107.61
25.00			Calcaire à silex		104.61

Figure 6- 6 Log validé du forage FT1-25 dans les alentours du site d'intérêt à Villamblain (InfoTerre, BRGM, 1994).



Figure 6- 7 Vue aérienne de la zone d'étude à Villamblain (Google Earth, mai 2016).

6.6. Le climat

Le climat est du type continental tempéré avec une influence océanique nette. Le module pluviométrique annuel moyen est de 630 mm à Villamblain. Le maximum de pluie (850

mm) a été enregistré en 1984, alors que le minimum (413 mm) l'a été pour l'année 1990. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle est de 767 mm (Ould Mohamed, 1995). Nous pouvons donc dire qu'en moyenne, il s'agit d'une zone en déficit hydrique climatique. D'où la présence de l'irrigation en agriculture.

La température moyenne annuelle est de 10,5 °C. Le mois plus froid est le mois de janvier, avec une valeur moyenne minimale de -1,2 °C en 1981. Le mois le plus chaud est juillet, avec une valeur moyenne maximale de 35,7 °C entre 1981 et 2018. L'ensoleillement annuel moyen est de 1800 heures, soit une valeur mensuelle moyenne de 149 heures. Les maxima d'ensoleillement sont enregistrés entre avril et septembre (Ould Mohamed, 1995).

6.7. Les sols

Le calcaire aquitanien est recouvert par une formation superficielle quaternaire limono-argileuse d'épaisseur variable, dans laquelle la teneur en argile est voisine de 30 % et la fraction limon est d'environ 60 % (Macaire, 1971 d'après Ould Mohamed, 1995). La fraction argile est essentiellement constituée de minéraux de type smectite et secondairement de type kaolinite et illite. Quant à la fraction limon, elle est constituée de quartz et feldspaths. Plus de 60 % de la surface à Villamblain possède un sol d'épaisseur inférieure à 60 cm (Ould Mohamed, 1995).

Les sols de Villamblain sont regroupés en cinq unités pédologiques cartographiques principales (Duval et Isambert, 1992 d'après Ould Mohamed, 1995) :

- une unité correspondant à des sols de type « brun lessivé », qui diffèrent par l'épaisseur et la nature du matériau sous-jacent. Ils se sont développés dans des limons d'épaisseur variant entre 60 et 120 cm.
- une unité de sols de type « brun lessivé » qui, à la différence des premiers, sont développés sur un limon argileux profond (> 120 cm) reposant sur des argiles tertiaires.
- une unité correspondant à des sols de type « brun calcique », qui diffèrent par la nature du matériau sous-jacent et l'épaisseur du matériau cryoturbé. Ces sols peuvent reposer sur des calcaires durs, des matériaux cryoturbés peu épais ou des matériaux cryoturbés épais. L'épaisseur de ces sols varie de 45 à 65 cm.

- une unité correspondant à des sols de type « brun calcaire », qui diffèrent par la nature du matériau sous-jacent : calcaires durs, calcaires pulvérulents, matériaux cryoturbés sur calcaires pulvérulents. Epaisseur 40-75 cm.
- enfin, une unité correspondant à des sols de type « brun calcaire » à « brun calcique », généralement très peu épais, situés dans les fonds de vallon et reposant sur des matériaux calcaires.

Plus en profondeur, Ould Mohamed (1995) décrit des faciès calcaires à structure homogène, dont certains sont constituées de calcaires durs sublithographiques, d'autres sont crayeux, friables et très poreux. Il a distingué aussi des calcaires tendres et friables, dit « pulvérulents ».

6.8. L'agriculture

En Beauce, 86 % de la superficie totale est cultivée (42000 ha). On y cultive principalement du blé, du maïs et secondairement de l'orge, du pois et du tournesol. Les céréales représentent environ 90 % de la surface agricole utilisée. La surface moyenne d'une exploitation est d'environ 80 hectares. Aujourd'hui, la quasi-totalité des cultures sont irriguées. La quantité d'azote apportée varie en général entre 180 et 220 kg/ha/an. L'irrigation est généralisée entre le mois d'avril et le mois de septembre.

6.9. Choix du site

La commune de Villamblain a été retenue pour évaluer les actions menées dans le cadre de la directive « nitrates » à l'échelle régionale (Schnebelen, 2000). Après une année d'observation, le site expérimental de Villamblain a été retenu en 1991. Le choix du site s'est basé sur les critères suivants :

- Qualité des eaux : la commune de Villamblain se trouve sur la zone où les plus fortes augmentations de concentration sont observées (fig. 6-4).
- Critères hydrogéologiques : une nappe peu profonde (entre 15 et 22 m), afin de pouvoir détecter l'influence des pratiques agricoles sur la teneur en nitrates des eaux souterraines. Les limites du site expérimental ont été définies à partir de cartes piézométriques réalisées sur le secteur en 1986 (en période d'étiage et en période de

haute eaux) et en 1990. La superficie de l'aquifère dans la zone de Villamblain est de l'ordre de 740 ha et la profondeur de la nappe est voisine de 15 m (Schnebelen, 2000).

D'autre part, les analyses effectuées sur les forages d'alimentation en eau potable des communes (forages AEP), ainsi qu'une campagne de prélèvements d'eau réalisée en 1987 sur les forages agricoles du secteur, ont montré des teneurs en nitrates comprises entre 40 et 90 mg/l, avec un moyenne proche de 70 mg/l. Ceci classe le secteur parmi les régions les plus atteintes en France par la pollution diffuse par les nitrates.

- Critères pédologiques : les sols devaient être représentatifs des sols de Beauce et, en particulier, des sols minces où le lessivage est maximum. On observe ici en majorité des sols bruns calciques peu épais à bruns calcaires (Ailliot et Verbèque, 1995 d'après Schnebelen, 2000).

- Critères agronomiques : L'occupation des sols à Villamblain est représentatif de la zone géographique de l'aquifère des calcaires de Beauce. La surface agricole utile à Villamblain est d'environ 2385 ha sur un total de la commune de 2600 ha répartie entre 27 exploitations. L'irrigation est généralisée sur 93 % des surfaces. Environ 50 % des surfaces sont laissées nues en hiver. Ces pratiques agricoles sont représentatives du système de culture de la Beauce du sud.

D'autre part, les agriculteurs du site expérimental de Villamblain sont sensibilisés au problème de la pollution des eaux souterraines par des substances d'origine agricole et sont prêts à faire évoluer leurs pratiques culturales.

CHAPITRE 7: DISPOSITIF EXPERIMENTAL. SYSTEME TRIAXIAL NON CONVENTIONNEL

Dans le cadre de ce travail de thèse, un dispositif expérimental a été mis en place en prenant en compte les adaptations précédentes afin de pouvoir mesurer les propriétés hydriques des matériaux de la ZNS de l'aquifère de Beauce. Différents critères ont été utilisés pour le choix de l'appareil de mesure utilisé (§4.8).

Dans un premier temps, on décrit les caractéristiques et les composantes du système triaxial utilisé.

Afin de pouvoir caractériser au laboratoire les propriétés hydriques des matériaux de la ZNS, nous avons été amenés à modifier et adapter un dispositif triaxial conventionnel. Deux aspects devaient être pris en compte :

- il devait être possible de contrôler de façon indépendante la pression d'air et la pression d'eau dans les pores de l'échantillon,
- la pression d'eau dans les pores devait rester positive afin d'éviter les problèmes de cavitation.

La différence entre notre dispositif et le système conventionnel est principalement liée à l'adaptation d'un piédestal ayant une céramique poreuse et un contrôleur de pression-volume de gaz. Ces deux accessoires permettent d'imposer les conditions non saturées dans l'échantillon.

7.1. Caractéristiques mécaniques et géométrie des composantes du dispositif

Le dispositif comporte deux composantes: i) la cellule triaxiale, y compris les vannes de haute pression et le piédestal, et ii) les contrôleurs pression-volume (CPV) (fig. 7-1).

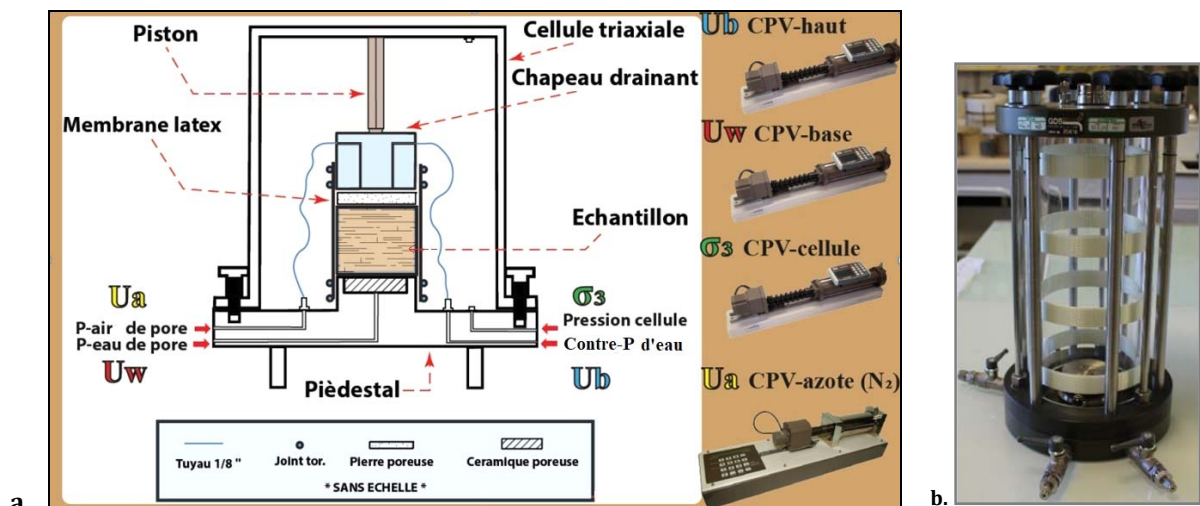


Figure 7- 1 Schéma général de la cellule du système triaxial non conventionnel et ses accessoires. b. Photo de la cellule triaxiale. CPV : contrôleur pression-volume, U_b : contre-pression d'eau au niveau du chapeau drainant, U_w : pression d'eau dans les pores au niveau de la céramique poreuse, σ_3 : pression d'eau dans la cellule, U_a : pression d'air dans les pores.

7.1.1. La cellule triaxiale

La cellule étanche, dans laquelle l'échantillon est installé pour être mis sous contrainte, comprend une partie inférieure, une enceinte cylindrique et une partie supérieure (fig. 7-1-b).

7.1.1.1 Partie inférieure (piédestal)

La partie inférieure, appelée piédestal, comporte en son centre une plaque circulaire qui recevra l'échantillon. Elle est traversée par des circuits hydrauliques aboutissant à trois sorties équipées de vannes de type swagelok de 2 MPa de pression maximale. Dans le piédestal, il y a une céramique (SOILMOISTURE Equipement) à Haute Entrée d'Air (HEA) de 1 bar (fig. 7-2) en remplacement de la pierre poreuse conventionnelle. Le piédestal utilisé a été conçu pour réaliser des essais en conditions non saturées grâce à la propriété de la céramique de ne pas laisser passer d'air pour une succion matricielle inférieure à 1 bar.



Figure 7- 2 Piédestal avec céramique poreuse HEA.

La céramique est un accessoire clé pour pouvoir contrôler et mesurer la pression d'eau dans les pores. Elle se comporte comme une membrane semi-perméable permettant de séparer la phase gazeuse et la phase liquide (Fredlund et Rahardjo, 1993). Cependant, cette propriété semi-conductrice est présente seulement si la valeur absolue du potentiel au PAE de la céramique est plus élevée que la succion matricielle du milieu. Le potentiel au PEA est une fonction de la taille de pore maximale de la céramique (Fredlund et Rahardjo, 1993) et suit la loi de Laplace (eq. 3-8). La succion au PEA est la valeur maximale de succion que la céramique peut subir avant de laisser passer l'air au travers. Plus les pores sont petits, plus sa succion au PEA est élevée. La figure 7-3 présente différents types de céramiques et leurs propriétés de stockage et de transport ainsi que leur succion au PEA. Le choix de la céramique pour cette étude (encadrée en rouge dans la figure 7-3) a été fait en fonction de la gamme de succion à appliquer à l'échantillon et de sa nature. Pour éviter une trop forte impédance hydraulique, il est conseillé de choisir une céramique avec une conductivité hydraulique égale ou plus élevée que le matériau étudié. Dans le cas contraire, il faudra prendre en compte la perte de charge hydraulique liée à la céramique. L'épaisseur est aussi importante. Une céramique de faible épaisseur peut réduire le temps pour atteindre l'équilibre, mais risque de produire une diffusion d'air plus rapidement. Plus la céramique est peu épaisse, plus l'air sera cumulé en aval (Fredlund et Rahardjo, 1993). Il existe aussi un risque de casse si les contraintes sur la céramique ne sont pas bien prises en compte (§7.2.1).

AIR ENTRY VALUE	BUBBLING PRESSURE (PSI)	APPROXIMATE POROSITY (% vol.)	SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY (cm/sec)	MAXIMUM PORE SIZE (μm)	FLOW THROUGH 1/4-INCH PLATE (ml/hr/cm ² /14.7 psi)
.5 BAR (-B0.5M2)* HIGH FLOW	7 TO 9	50%	3.11×10^{-5}	6.0	180
1BAR (-B01M3)* HIGH FLOW	19 to 28	45%	8.6×10^{-6}	2.5	50
1 BAR (-B01M1)* STANDARD FLOW	20 to 30	34%	7.56×10^{-7}	1.7	5.0
2 BAR (-B02M1)* STANDARD FLOW	38 to 45	32%	6.30×10^{-7}	1.1	4.2
2 BAR (-B02M2)* HIGH FLOW	32 to 42	38%	6.93×10^{-7}	1.3	4.6

Figure 7- 3 Gamme de céramiques en fonction du potentiel au PAE (Soilmoisture). La céramique utilisée dans le dispositif de mesure des propriétés hydriques des matériaux de la ZNS est encadrée en rouge.

7.1.1.2 Enceinte cylindrique (cellule)

L'enceinte cylindrique ou cellule triaxiale est en aluminium avec du PVC renforcé transparent ce qui permet de suivre l'évolution de l'échantillon pendant les essais (fig. 7-1-b). Elle a été conçue pour des essais triaxiaux de type statique. La cellule est connectée à chaque CPV (4 en tout) via des vannes de haute pression (fig. 7-4). Les dimensions de l'enceinte sont de 230 mm en diamètre et 530 mm en hauteur, avec une résistance à une pression de confinement maximale de 3.5 MPa. Les dimensions internes de la cellule permettent de monter des piédestals de diamètre compris entre 50 mm et 76 mm. Pour ce projet, le diamètre choisi est de 70 mm.



Figure 7- 4 Le système triaxial non conventionnel utilisé pour la mesure des propriétés hydriques des matériaux de la ZNS.

7.1.1.3 Partie supérieure

La partie supérieure ou couvercle est équipée d'une sortie avec une vanne de purge d'air et d'autres types de raccords pour installer des accessoires. En son centre, il y a un piston de 25 mm de diamètre dont la tige traverse le couvercle. Cette tige peut coulisser facilement, de façon étanche, pour transmettre les contraintes de déformation de l'échantillon. Dans notre cas, il n'y a pas de contrainte axiale imposée par le piston, car ce n'est pas l'objectif de notre étude. Au contraire, les essais sont menés en conditions isotropes. Par contre, la tige appuie légèrement sur l'échantillon pour l'aider à rester bien placé et droit pendant les manipulations.

Ces trois parties sont ajustées et assemblées hermétiquement au moyen de joints toriques placés dans des gorges.

7.1.2. Les contrôleurs pression-volume (CPV)

Quatre CPV sont utilisés dans ce système, dont trois contrôleurs d'eau (en tête, à la base de l'échantillon et dans la cellule) et un contrôleur de gaz pour imposer les conditions de saturation variable (fig. 7-1-a). Les CPV, quand ils sont utilisés indépendamment, fournissent une source de pression constante. Ils peuvent remplacer d'autres systèmes traditionnels, tels que la colonne de mercure qui était en usage à l'origine dans les laboratoires, le compresseur d'air ou la pompe à huile (Chossat, 2005). C'est aussi un appareil capable de mesurer des volumes avec une résolution de 1 mm³. Ils peuvent être complètement asservis et faire partie d'une chaîne de mesure automatisée, ce qui est le cas pour la méthode que nous allons mettre œuvre. Le tableau 7-1 ci-dessous montre les caractéristiques des CPV utilisés.

Tableau 7- 1 Précision et résolution des contrôleurs de pression-volume (GDS Instruments Product, 2015)

	Précision		Résolution
	Erreur caractéristique	Erreur environnementale	
Pression	0,1 % (PE)* 0,05 % (VM)*	0,025 % / °C (VM)	0,1 KPa (CPV _{gaz}), 1 KPa (CPV _{liq})
Variation de volume	0,25 % (VM)*	0,02% / °C (VDC)* 0,2% / MPa (VDC)	0,5 mm ³ (CPV _{gaz}), 1 mm ³ (CPV _{liq})

* PE : Pleine échelle, VM : Valeur mesurée, VDC : Volume d'eau dans le CPV

Par rapport au principe de fonctionnement, chaque CPV fonctionne à l'aide d'un moteur pas à pas et d'une vis sans fin qui active un piston mettant l'eau ou le gaz sous pression directement. La pression est régulée par un contrôle en boucle interne fermée et mesurée par un capteur interne en sortie du cylindre (fig. 7-5). Les variations de volume sont mesurées par le comptage de chaque pas du moteur.

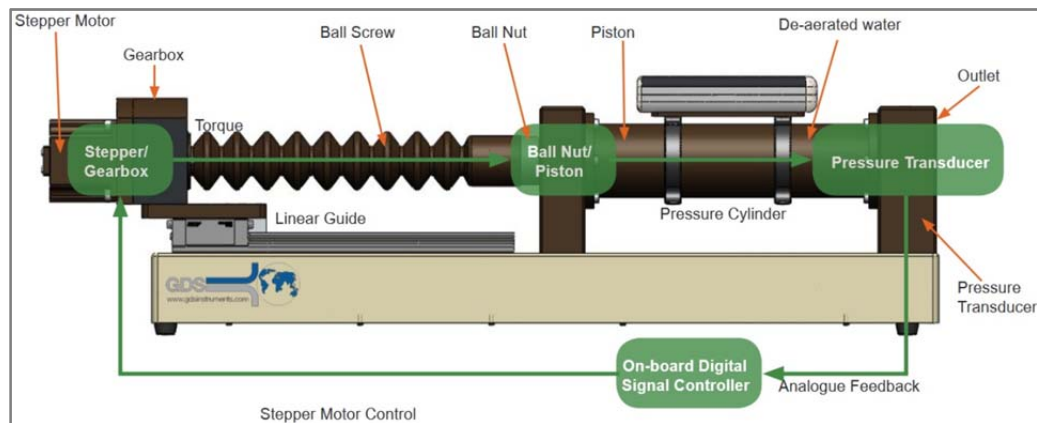


Figure 7- 5 Schéma de fonctionnement d'un CPV (GDS Instruments Product, 2015).

Deux modes d'utilisation sont possibles pour piloter un CPV:

1. Le mode manuel est lancé grâce au clavier 16 touches à membrane (figure 7-6) qui reconnaît automatiquement le contrôleur et affiche les valeurs des 2 paramètres (pression, volume) en temps réel.



Figure 7- 6 Clavier à membrane pour le pilotage manuel d'un CPV.

2. Le mode PC-Logiciel GDSLAB permet un pilotage depuis un ordinateur via un port USB. Il y a un ensemble de modules permettant d'utiliser le dispositif de façon automatisée grâce à l'interface GDSLAB (fig. 7-7).

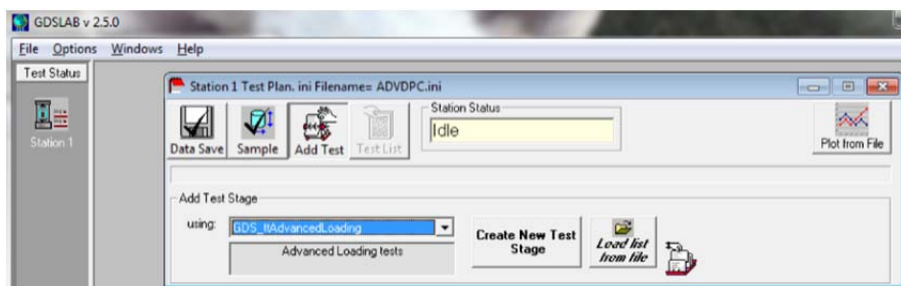


Figure 7- 7 Logiciel GDSLab.

7.1.3. Equipement de l'échantillon

7.1.3.1 Membrane

Sa fonction est d'isoler l'échantillon du fluide qui se trouve dans la cellule (fig. 7-8). C'est un matériau en latex ou en caoutchouc. Les membranes en caoutchouc sont plus résistantes. Elles sont utilisées quand il y a risque de poinçonnement à cause du type d'échantillon et de la contrainte imposée.

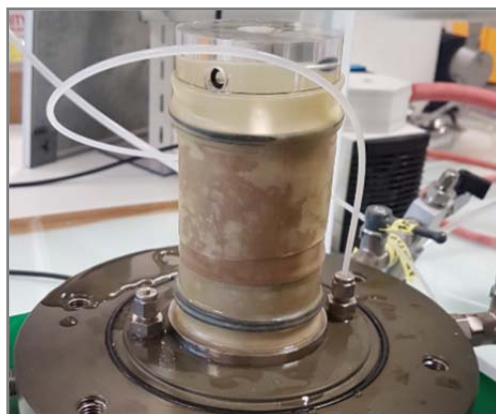


Figure 7- 8 Montage d'un échantillon dans la cellule triaxiale.

7.1.3.2 Pierre poreuse

Dans un système conventionnel, deux pierres poreuses (fig. 7-9) sont placées sur les faces circulaires supérieure et inférieure de l'échantillon. Pour le montage que nous avons utilisé, il y a une seule pierre poreuse placée sur le haut de l'échantillon. Il faut que le matériau soit plus perméable que l'échantillon et que sa déformation soit négligeable par rapport à la déformation de l'échantillon (Chossat, 2005). Les dimensions de cette pierre poreuse sont 70 mm de diamètre et 7,14 mm d'épaisseur.



Figure 7- 9 Pierre poreuse.

7.1.4. Phases mobiles utilisées

Il y a deux fluides utilisés pour les expériences en non saturé. La solution dans l'échantillon contient du CaCl_2 à une concentration de 0,01 M pour éviter la dispersion des minéraux argileux (Hopmans et al., 2001) et 3 gouttes/L de NaOCL à une concentration de 10 % pour neutraliser la microflore (Winfield, 2000). La phase gazeuse contenue dans l'échantillon est de l'azote à 99,995 % de pureté pour éviter le phénomène d'exsolution pendant l'essai non saturé (Hopmans et al., 2001).

7.1.5. Accessoires

Il faut disposer d'un certain nombre d'accessoires pour effectuer des manipulations :

- un pied à coulisse,
- du papier filtre,
- une étuve pour réaliser les mesures de teneur en eau (à 105 °C),
- des brosses pour débarrasser le piédestal et la pierre poreuse des particules qui y resteraient attachées après le démontage de l'échantillon.
- des billes de verre.

7.1.6. Climatisation

Pour ce type de mesure, il est nécessaire de disposer d'un laboratoire climatisé où la température est contrôlée. La température de la salle est fixée à 20°. Selon la norme NF X 30-443, la température de la salle doit être maintenue à 20 ± 2 °C. La température dans la salle est enregistrée avec un thermocouple Campbell modèle 107 branché à une centrale d'acquisition Campbell modèle CR1000.

7.1.7. Désaération de la phase liquide

Un système de désaération sous vide a été mis en place pour désaérer la solution du système triaxial. Le dispositif Nold 2100 (fig. 7-10) est connecté à une pompe à vide pour dégazer la solution stockée dans le réservoir pendant l'agitation.



Figure 7- 10 Désaérateur Nold série 2100, 8 litres (GEOKON).

7.2. Protocole expérimental de montage des échantillons dans la cellule triaxiale

7.2.1. Saturation de la céramique

Pour éviter des pertes d'énergie à travers la céramique et/ou un blocage du flux pendant les essais de conductivité hydraulique, il faut d'abord s'assurer de sa bonne saturation.

Pour obtenir la saturation complète de la céramique, il est conseillé de l'immerger dans l'eau distillée dans une enceinte sous vide pendant 48 heures, pour ensuite finir la saturation à l'aide du système triaxial. Il faut aussi bien saturer les circuits compris dans la base de la cellule avant d'installer le piédestal. Une fois le piédestal installé dans la base de la cellule, la saturation est vérifiée en injectant de l'eau par la base du piédestal avec le CPV-base (fig. 7-1-a) pendant 24 heures. Si aucune bulle n'est observée sur la surface de la céramique, elle est considérée comme saturée.

Par sécurité, il est conseillé de ne pas excéder 100 KPa de gradient entre le bas et le haut de la céramique pour éviter le risque de casse (figure 7-11).

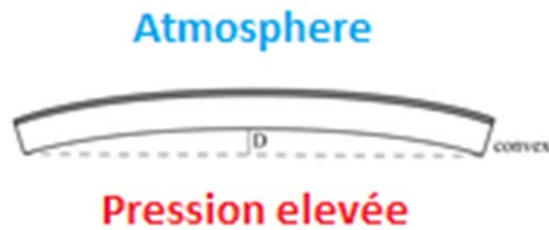


Figure 7- 11 Déformation de la céramique en présence d'un fort gradient de pression.

7.2.2. Montage de l'échantillon.

Au préalable, la pierre poreuse est saturée par capillarité avec une solution aqueuse (0,01 M CaCl_2 et 3 gouttes/L de NaOCl à 10%) dans un cristallisateur à l'aide d'une pompe à vide.

1°) On connecte le système de mise en pression (les 4 CPV préalablement remplis et purgés) et on sature les circuits de drainage de la cellule triaxiale à l'aide des CPVs.

2°) Une solution aqueuse de billes de verre est versée sur le papier filtre qui est d'abord placé sur la céramique (le papier filtre a été saturé préalablement) pour améliorer la continuité hydraulique et éviter le piégeage d'air en dessous de l'échantillon. Le rapport silice/eau (g/g) est d'environ 4/3. Cela permet un contact total entre la surface de la céramique et la surface de l'échantillon et donc une continuité hydraulique efficace sur la totalité de la surface de l'échantillon (fig. 7-12). Environ 35 grammes de pâte de billes de verre saturée suffisent pour recouvrir la totalité du diamètre de l'échantillon. La mesure de volume cumulé à la sortie de la céramique est corrigée par la quantité d'eau stockée par la pâte de bille de verre qui a été partiellement extraite pendant l'essai multi-step. Normalement, la couche du mélange billes de verre-eau est peu épaisse (environ 2 mm). Plus la couche est fine, moins l'effet des billes de verre sur les mesures est important.

3°) On place l'échantillon sur la pâte de billes de verre et on s'assure de bien dégager les restes de pâte qui débordent en dehors du piédestal. Ensuite on place un papier filtre saturé, la pierre poreuse saturée et le chapeau drainant (fig. 7-12).



Figure 7- 12 Préparation de l'échantillon pour la mesure de propriétés hydriques. Du bas vers le haut : piédestal avec céramique poreuse, papier filtre, pâte de silice, échantillon, papier filtre, pierre poreuse et chapeau drainant.

4°) On fixe la membrane en latex avec des joints toriques sur l'ensemble de l'échantillon. La membrane doit être préalablement trempée dans l'eau pendant 4 heures puis égouttée. La membrane est préparée à l'aide d'un moule d'étirement (fig. 7-13-a) et d'une poire à succion en caoutchouc (fig. 7-13-b). La membrane est d'abord placée dans le moule (fig. 7-13-a).

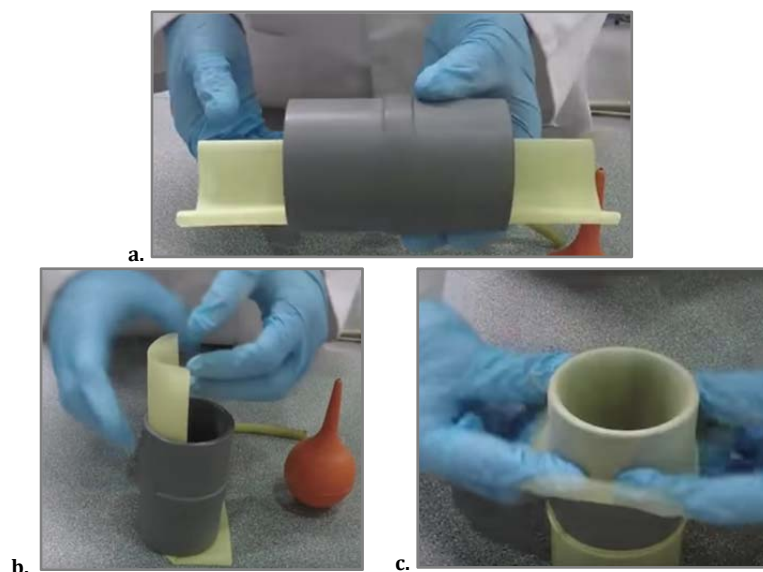


Figure 7- 13 Préparation de la membrane à l'aide des accessoires.

La poire en caoutchouc est ensuite utilisée pour faire le vide entre la membrane et le moule et bien coller la membrane aux parois du moule (fig. 7-14-a). Le moule avec la membrane collée aux parois est placé autour de l'ensemble piédestal-échantillon-chapeau drainant (fig. 7-14-b). Une fois en position, la poire à succion est enlevée pour lâcher le vide et permettre à la membrane de se coller à l'échantillon. Les deux extrémités de la membrane sont déroulées pour enlever le moule et des joints toriques sont placés au niveau de piédestal et du chapeau drainant à l'aide de l'anneau d'étirage

(fig. 7-15-a). Les deux extrémités de la membrane sont ensuite placées sur les joints toriques (fig. 7-15-b).

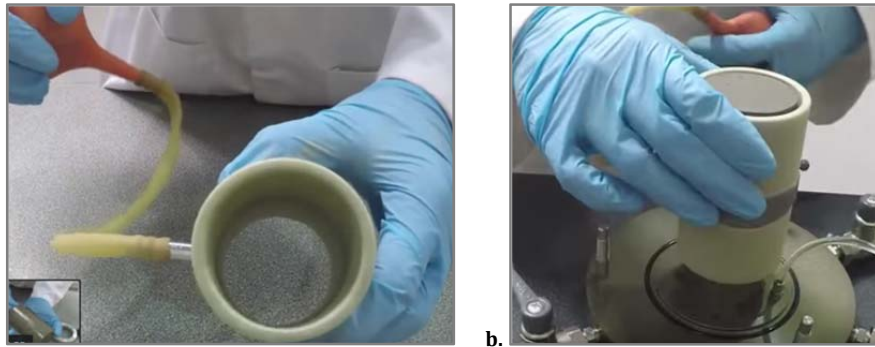


Figure 7- 14 a) Utilisation de la poire de succion pour coller la membrane au moule, b) Placement du moule avec la membrane autour de l'échantillon.

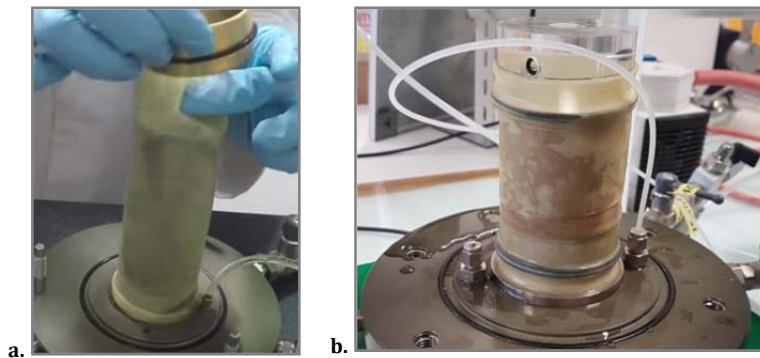


Figure 7- 15 a) Etirement du joint torique au niveau du chapeau drainant, b) Membrane fixée à l'échantillon.

5°) On connecte avec précaution les raccords sur le chapeau drainant permettant de connecter les tuyaux 1/8" raccordés aux contrôleurs.

6°) On vérifie l'état de la membrane et l'étanchéité du système visuellement avant d'installer la cellule.

7°) On ferme la cellule en plaçant la partie cylindrique sur l'embase inférieure (fig. 7-1-b). L'étanchéité est assurée par le joint torique à la base de l'échantillon (fig. 7-15-b). On serre uniformément l'ensemble à l'aide de vis pour assurer l'étanchéité de la cellule. On vérifie également la verticalité de l'échantillon en touchant légèrement le chapeau drainant avec la tige du piston (fig. 7-1-a). Il faut fixer et bloquer ce piston avant de remplir la cellule.

8°) On remplit délicatement la cellule avec la solution aqueuse désaérée en permettant à l'air de s'évacuer par le haut en ouvrant la vanne de purge. Lorsque la cellule est remplie, on ferme le système de purge.

9°) Sur chacun des 4 contrôleurs, on fait la tare du volume et de la pression par rapport à la pression de la salle. Il est conseillé de bien identifier les contrôleurs avec des scotchs de différentes couleurs et d'ajouter des mots de précaution sur les robinets haute pression pour éviter de faire une mauvaise manipulation pendant les essais.

7.3. Protocole de montage pour la mesure des propriétés hydriques de la pâte de billes de verres.

Le protocole pour les mesures de propriétés hydriques de la pâte des billes de verre est exactement le même que celui appliqué aux échantillons de la ZNS. En revanche, le montage dans la cellule est délicat car la silice étant en forme de particules très fines, il est impossible de préparer une éprouvette comme indiqué précédemment. Pour ce cas particulier, nous avons utilisé un anneau en PVC avec un diamètre externe de 70 mm et un diamètre interne de 54 mm. La hauteur du cylindre est de 2 cm (fig. 17-16-a).

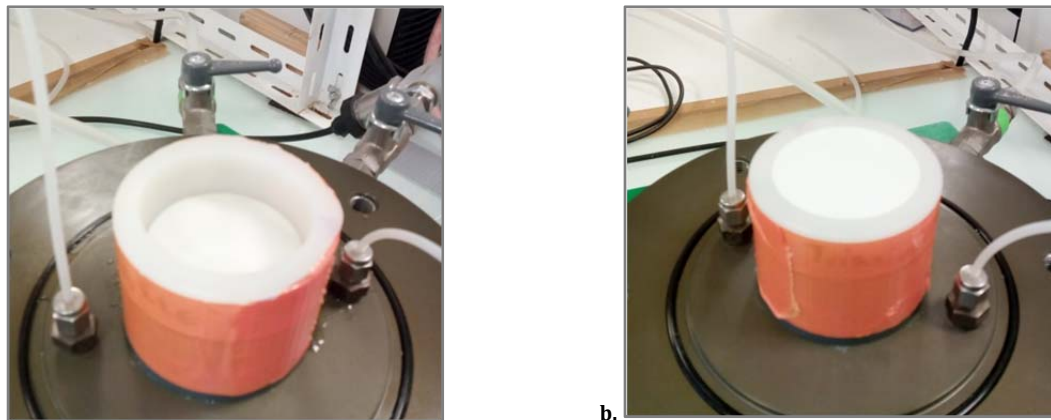


Figure 7- 16 a) Cylindre PVC fixé au piédestal de la cellule triaxiale, b) remplissage du cylindre PVC avec des billes de verres.

Avant d'avoir fixé le cylindre PVC, nous avons collé un papier filtre de 70 mm de diamètre à la base du cylindre pour éviter la fuite de billes pendant l'essai. Ensuite, le cylindre a été fixé au piédestal pour aider à centrer l'ensemble pendant la fixation de la membrane. Ensuite, le cylindre est rempli avec une masse sèche connue de billes de verre pour avoir une masse volumique de $1,45 \text{ g/cm}^3$ (calculée expérimentalement). Avec cette masse volumique, la quantité nécessaire pour remplir le cylindre ($45,8 \text{ cm}^3$)

est 66,4 g des billes de verres. Finalement, la membrane latex est placée avec le même protocole présenté dans la section 7.2.2. Il faut éviter la perte de matériau pendant les manipulations pour ne pas avoir de fausses mesures de teneur en eau.

CHAPITRE 8: MESURE DES PROPRIETES HYDRIQUES A L'AIDE DU SYSTEME TRIAXIAL

8.1. Mesure des propriétés hydriques en condition saturée

8.1.1. Matériaux meubles de la ZNS

Les matériaux meubles de la ZNS ont une certaine plasticité et peuvent se déformer pendant leur manipulation au moment du montage dans le système de mesure. Pour éviter cet inconvénient, les échantillons sont saturés après le montage dans la cellule triaxiale à l'aide de l'ensemble des contrôleurs et du logiciel GDS-Lab, qui comporte des modules spécifiques pour la saturation et sa validation.

8.1.1.1 Saturation de l'échantillon

La saturation de l'éprouvette est une étape préliminaire critique très importante pour une mesure correcte des propriétés hydriques. Le protocole de saturation a été adapté à la nature de l'échantillon (matériau meuble ou roche dure).

8.1.1.1.a) Saturation manuelle

Dans le premier temps, on réalise la saturation de l'échantillon en appliquant un faible gradient de pression de confinement. Cela évite de déformer l'échantillon et de modifier la géométrie de pores qui sont partiellement remplis d'air, ce qui peut engendrer une réorganisation des grains du milieu poreux à cause de l'absence de fluide incompressible dans l'espace poral.

Dans un système triaxial, la circulation de l'eau dans l'échantillon est provoquée par l'application d'une différence de pression d'eau ΔP entre la base et le sommet de l'échantillon (gradient hydraulique). Pour créer ce gradient, un CPV phase liquide est connecté à la base de l'échantillon avec une pression d'entrée U_w et un deuxième CPV phase liquide est connecté en tête avec une pression U_b , inférieure à U_w (fig. 7-1 et 8-1). En effet, l'écoulement doit se faire du bas vers le haut pour faciliter l'élimination de l'air et permettre la saturation la plus complète possible (Chossat, 2005). La pression de la

cellule σ_3 doit également s'appliquer pour éviter la déformation de l'échantillon lors de la mise sous pression de l'eau.

Le gradient de pression ΔP dans l'échantillon lors de cette première étape est d'environ 5 KPa, avec une contrainte effective de consolidation $\sigma_c = (\sigma_3 - U_w)$ d'environ 1 KPa. Les valeurs d' U_w et U_b appliquées sont 10 et 5 KPa respectivement. L'effet de consolidation est donc négligeable par rapport au gradient de pression.

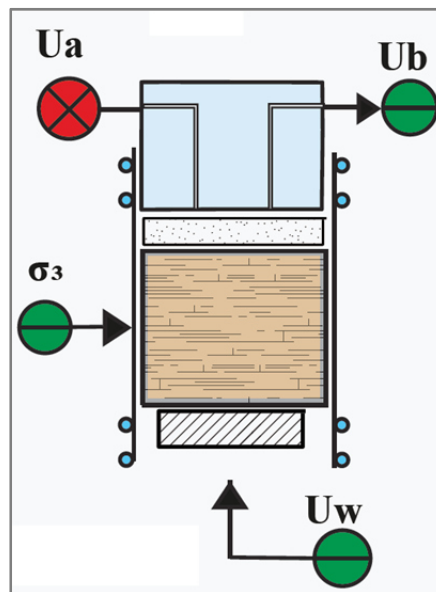


Figure 8- 1 Schéma général d'écoulement dans l'échantillon pour l'essai en saturation. U_a : pression d'air dans les pores, U_b : pression d'eau dans les pores au sommet de l'échantillon, σ_3 : pression d'eau dans la cellule, U_w : pression d'eau dans les pores à la base de l'échantillon.

Cette première saturation est dite « manuelle », car le pilotage des contrôleurs se fait directement sur le clavier sans aucune automatisation. Cette condition de flux est maintenue de 24 à 48 heures, ce qui permet d'injecter suffisamment d'eau pour pouvoir déplacer une grande partie des bulles d'air. La durée de cette première étape est fonction de la perméabilité de l'échantillon et de son état de saturation naturel.

Avant de passer à l'étape suivante, le contrôleur en aval est purgé pour sortir les bulles d'air chassées par l'eau sortant de l'échantillon par le haut. A ce moment-là, toutes les bulles d'air mobiles ont été déplacées, mais il reste encore des bulles qui seront uniquement éliminées par dissolution dans l'eau en présence de pressions plus importantes.

8.1.1.1.b) Saturation automatique en rampe

Cette étape est lancée à l'aide du logiciel contrôlant les CPV, ce qui permet de programmer une rampe de pression graduelle en fonction du temps pour éviter la déformation de l'échantillon. Une rampe de saturation est généralement utilisée soit pour modifier les pressions dans le système tout en gardant une contrainte effective constante, soit pour appliquer une contrainte effective donnée (GDS Instruments d'après Sols Mesures, 2008).

L'écran qui correspond à cet essai se présente ainsi (fig. 8-2) : le logiciel affiche les pressions actuelles de la cellule et de l'eau dans l'échantillon. On entre les valeurs à atteindre dans les cases blanches ainsi que le temps souhaité pour y arriver. Plus la vitesse d'évolution de la pression (KPa/min) est élevée, plus l'échantillon est susceptible de se déformer.

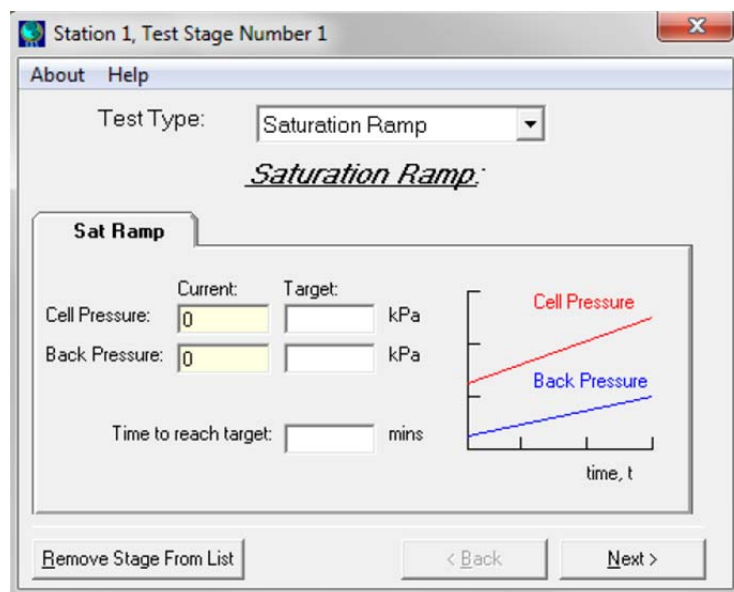


Figure 8- 2 Module de saturation en rampe.

Une évolution lente des pressions permet à l'eau d'occuper progressivement l'espace poral et d'éviter les réarrangements de grains dans les zones de l'espace poral encore remplies d'air. L'évolution de la pression dans le système est présentée dans la figure 8-3. SR1 représente le temps de fin de la première rampe jusqu'à une pression de 500 KPa (5 bar). A ce moment-là, la pression de l'eau dans l'échantillon est la même partout

(point d'intersection des lignes rouge et bleue). On observe que la ligne jaune (pression dans la cellule) est parallèle aux lignes rouge et bleue.

Le premier palier est à 500 KPa. D'après les nombreuses observations réalisées pendant les essais, on n'observe plus de bulles d'air piégées dans l'échantillon quand la pression d'eau dépasse 4 bars (400 KPa) à 21 °C. Cependant, pour assurer une dissolution complète, la pression est augmentée d'un bar en plus, par sécurité (fig. 8-3).

La rampe de pression imposée est de 0,35 KPa/min, c'est-à-dire qu'il faut environ 24 heures pour atteindre 500 KPa dans le système. Une inspection visuelle est faite pour savoir s'il reste encore de l'air piégé. Si c'est le cas, un deuxième palier de 100 KPa est lancé à 0,35 KPa/min et ainsi de suite (annexe 8-1).

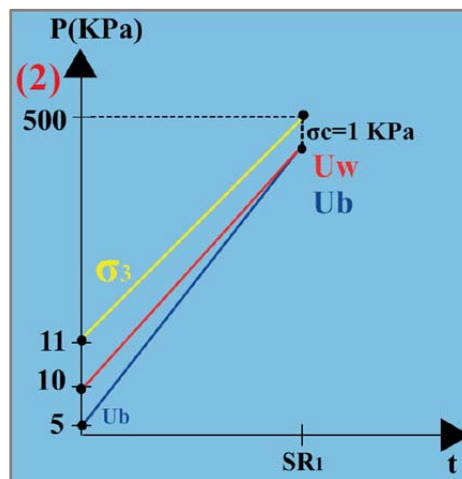


Figure 8- 3 Représentation graphique de la rampe de pression pendant l'étape de saturation

8.1.1.2 Validation de la saturation (paramètre B_w)

8.1.1.2.a) Principes théoriques

La variation de la pression d'eau dans les pores à cause du confinement est appelé le paramètre B_w (Fredlund et Rahardjo, 1993). Selon la figure 8-4 (essai en condition isotrope et non drainée), la pression dans les pores remplis d'eau augmente plus que la pression dans les pores remplis d'air en réponse à un incrément de la pression de confinement dans la cellule. Si l'incrément de pression isotrope (pression dans la cellule) est référencé à l'état initial, le paramètre de variation de pression de pores pour la phase gazeuse, B_a , s'exprime de la façon suivante:

$$B_a = \frac{\Delta U_a}{\Delta \sigma_3} \quad \dots(8-1)$$

où ΔU_a est l'incrément de la pression de gaz dans les pores à cause de l'incrément de pression isotrope $\Delta \sigma_3$. La variation de la pression de gaz des pores est mesurée à partir de la condition initiale ($U_a - U_{a0}$). $\Delta \sigma_3$ est l'incrément de la pression de confinement en conditions isotopes à partir de sa condition initiale ($\sigma_3 - \sigma_{3(0)}$).

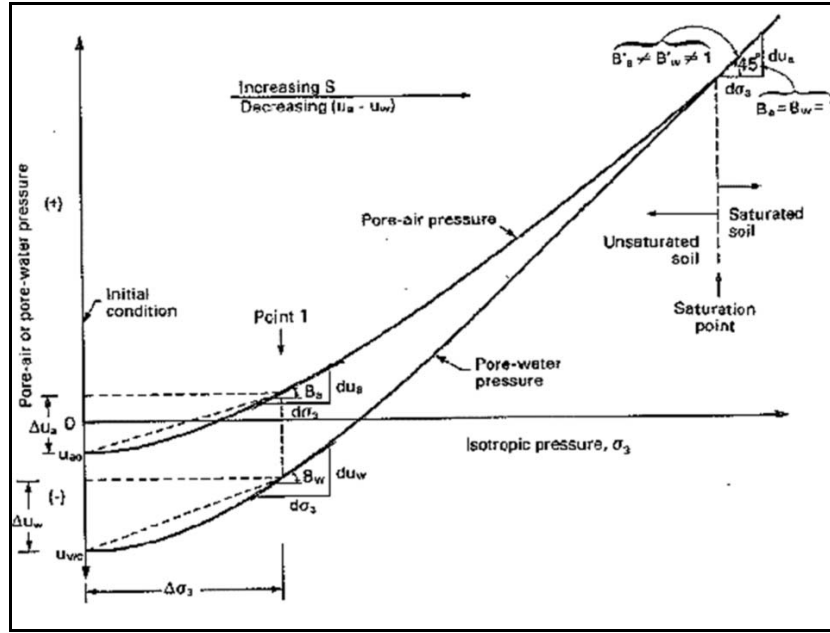


Figure 8- 4 Paramètres de pression tangent et sécant.

De la même façon, le paramètre de variation de pression dans les pores pour la phase liquide, B_w , est exprimé par :

$$B_w = \frac{\Delta U_w}{\Delta \sigma_3} \quad \dots(8- 2)$$

où ΔU_w est l'incrément de la pression d'eau dans les pores à cause de l'incrément de pression isotrope $\Delta \sigma_3$. La variation de la pression de pore d'eau est mesurée à partir de la condition initiale ($U_w - U_{w0}$).

La mesure de B_w est en fait un test pour vérifier que l'échantillon est suffisamment saturé. Le coefficient B_w est appelé aussi « paramètre de Skempton » (Fredlund et Rahardjo, 1993).

8.1.1.2.b) Test de B_w

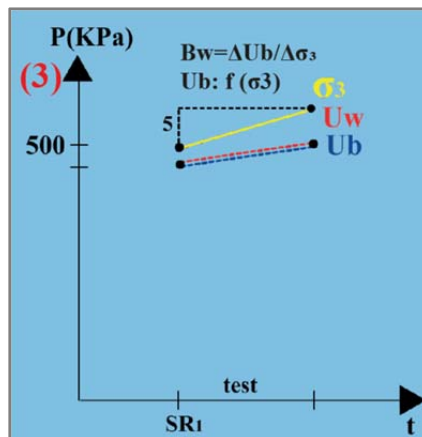
A saturation, la variation de la contrainte de pression de confinement engendre un changement égal de la pression d'eau dans les pores, étant donné la faible compressibilité de l'eau et de la phase solide (Skempton, 1954 d'après Fredlund et Rahardjo, 1993). Le principe est de provoquer une augmentation de la pression de confinement (coté cellule) sans variation de volume au niveau du chapeau drainant. La variation de pression au niveau de la cellule ($\Delta\sigma_3$) est de 5 KPa, selon le protocole établi. Le système compare alors les variations de la pression d'eau interstitielle (ΔU_w et ΔU_b) causées par l'augmentation de la pression de la cellule ($\Delta\sigma_3$) (figure 8-5). La valeur de B_w peut être alors calculée selon l'équation 8-2.

Tableau 8- 1 Paramètre B_w pour différents types de matériaux saturés ou proches de la saturation (Black and Lee, 1973 d'après Fredlund et Rahardjo, 1993). S_e : degré de saturation.

Type de matériau	*Taux de vide, e	*Compressibilité du sol (1/KPa)	Paramètre B_w		
			$S_e=100\%$	$S_e=99,5\%$	$S_e=99\%$
Meuble (argiles consolidées)	2	$1,45 \times 10^{-3}$	0,9998	0,992	0,986
Medium (argiles compactées)	0,6	$1,45 \times 10^{-4}$	0,9988	0,963	0,93
Rigide (argiles rigides-sable)	0,6	$1,45 \times 10^{-5}$	0,9877	0,69	0,51
Très Rigide (pression de consolidation élevée)	0,4	$1,45 \times 10^{-6}$	0,913	0,2	0,1

* valeurs approximatives

Le critère choisi pour valider la saturation est une valeur de B_w supérieure ou égale à 0,93 pour un matériau moyennement compacté avec une saturation d'environ 99% et sous conditions de charges isotropes (tab. 8-1). Si la variation de la pression interstitielle (ΔU_w) imposée dans l'échantillon atteint 93 % ou plus de la variation de la pression de confinement ($\Delta\sigma_3$) imposée dans la cellule, la saturation est considérée comme atteinte.



Cette condition limite est vérifiée par l'algorithme interne du logiciel dans une boucle de 5 minutes. Si la valeur mesurée n'atteint pas 0,93, il faut lancer une autre rampe de saturation, car il reste encore des bulles d'air quelque part dans le système (échantillon, tubulures, pierre poreuse, etc.). La boucle effectuée est montrée dans les annexes (annexe 8-1). Si la saturation a été finalement validée par la méthode de contrôle de B_w , la prochaine étape sera la consolidation de l'échantillon décrite ci-après. Le module du logiciel GDS-Lab correspondant à l'essai B_w est présenté en annexe (annexe 8-2).

8.1.1.3 Consolidation de l'échantillon

L'étape de consolidation permet de fixer les conditions de pression de confinement afin de simuler les contraintes mécaniques du terrain. C'est la dernière étape préalable à l'essai de conductivité hydraulique.

Souvent, il faut réajuster légèrement (incrémenter) les pressions du système car, pendant le test de B_w , les pressions U_w et U_b augmentent de façon non linéaire en réponse à la contrainte imposée au niveau de la cellule. Pour mieux comprendre l'étape de consolidation, on peut imaginer les valeurs suivantes avant un essai de contrôle de B_w : $\sigma_3 = 500$ KPa, $U_b = 490$ KPa, $U_w = 495$ KPa. Après d'avoir lancé l'essai avec une pression de cellule à atteindre de 510 KPa, au bout de 5 min, les pressions ont changé de la façon suivante: $\sigma_3 = 510$ KPa, $U_b = 497$ KPa, $U_w = 501$ KPa. Si la consolidation σ_c doit être 15 KPa (condition réelle), il va falloir augmenter σ_3 à 516 KPa et U_b à 501 KPa afin d'avoir une consolidation homogène de 15 KPa partout dans l'échantillon.

La consolidation est obtenue en appliquant une pression de confinement σ_3 constante et une pression au niveau du chapeau drainant (U_b) constante pendant un temps donné tout en enregistrant les variations du volume total de l'échantillon, V_T (annexe 8-3). La consolidation visée est atteinte lorsque les variations de volume de l'échantillon deviennent négligeables.

Le critère de vérification de la consolidation est le suivant:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta t} \leq 20 \text{ mm}^3 / 5 \text{ min} \quad \dots(8-3)$$

En condition saturée, la variation de volume de l'échantillon est représentée par la variation de volume d'eau en sortie (chapeau drainant). La vérification est faite par des itérations de durée comprise entre 0 et 5 minutes tant que la valeur de la variation de volume est supérieure ou égale à 20 mm^3 . Ainsi, l'essai peut durer des heures avant d'atteindre l'équilibre.

8.1.1.4 Equations pour le calcul de la conductivité hydraulique à saturation

Les données mesurées à l'aide du dispositif de triaxial sont utilisées pour calculer K_{sat} avec les équations suivantes :

$$K_{sat} = \frac{\bar{q}}{\nabla H} \quad \dots(8-4)$$

$$\bar{q} = \frac{\bar{Q}}{A} \quad \dots(8-5)$$

$$\bar{Q} = \frac{V_w}{t} \quad \dots(8-6)$$

$$\nabla H = \left(\frac{U'_w - U_b}{L} \right) \quad \dots(8-7)$$

où $\bar{q}$ [LT^{-1}] est la densité de flux ou vitesse apparente moyenne de l'eau pour un intervalle de temps t , $\bar{Q}_{CPV}$ [$\text{L}^3.\text{T}^{-1}$] est le débit moyen pendant l'intervalle de temps t , A [L^2] est la surface de la section moyenne de l'échantillon, perpendiculairement au flux, V_w [L^3] est la moyenne du volume d'eau cumulé mesuré par les deux CPV (base et haut, fig. 7-1), t [T] est l'intervalle de temps ($t_{\text{final}} - t_{\text{initial}}$), ∇H [L.L^{-1}] est le gradient de pression dans l'échantillon, U'_w [L] est la charge hydraulique à l'interface céramique-échantillon,

U_b [L] est la charge hydraulique au sommet de l'échantillon, L est la hauteur de l'échantillon [L].

8.1.1.4.a) Correction de pression à cause de l'impédance hydraulique de la céramique

La pression de pore enregistrée par le contrôleur en aval n'est pas la même que celle au niveau de la base de l'échantillon (interface céramique-échantillon). Il y a une perte de charge à cause de la céramique poreuse due à son PEA élevé. Une correction doit donc être faite à cause de cet effet d'impédance hydraulique.

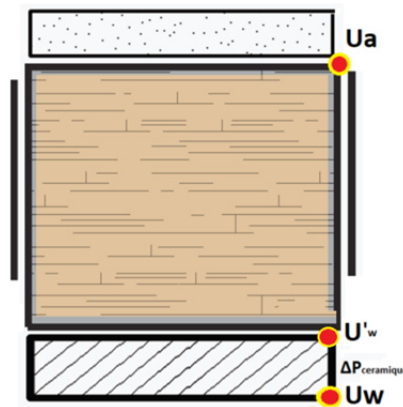


Figure 8- 6 Impédance hydraulique de la céramique.

La pression de l'eau dans les pores au niveau de l'interface entre la céramique et l'échantillon, U'_w , est calculée à partir de la conductivité hydraulique à saturation de la céramique poreuse (K_c), de la pression d'eau appliquée par le contrôleur en aval, U_w , et du flux d'eau pendant l'essai du débit d'extraction. La densité de flux à travers la céramique est exprimée selon l'équation suivante :

$$\bar{q} = -K_c \left(\frac{U_w - U'_w}{L_c} \right) \dots (8- 8)$$

où $\bar{q}$ est le flux d'eau (eq. 8-5) et L_c , l'épaisseur de la céramique [L].

Avec $z=0$ placé à l'interface céramique-échantillon et l'écoulement dans le sens vertical vers la base considéré comme positif, la charge totale de l'eau U'_w à l'interface s'exprime par :

$$U'_w = U_w + \frac{L_c}{K_c} \bar{q} \quad \dots(8-9)$$

Finalement le potentiel matriciel corrigé à la base de l'échantillon s'exprime:

$$h = U'_w - U_a \quad \dots(8-10)$$

8.1.1.4.b) Correction due aux variations de température

La correction de K_{sat} due aux variations de température est faite avec l'équation suivante :

$$K_{sat\ 20^\circ} = K_{sat} \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ}} \quad \dots(8-11)$$

où K_{20° est la conductivité hydraulique à saturation à 20 °C, K_{sat} est la conductivité hydraulique à la température T, μ_T est la viscosité dynamique de l'eau à la température T, μ_{20° est la viscosité dynamique de l'eau à 20 °C.

D'après Helmholtz, la viscosité dynamique varie en fonction de la température selon la relation empirique suivante (Chossat, 2005):

$$\mu_T = \frac{1,78}{[1 + (0,0337 T) + (0,00022 T^2)]} \quad \dots(8-12)$$

où T est la température de la salle (°C), μ_T est la viscosité dynamique de l'eau (KPa.s) à la température T.

8.1.1.4.c) Mesure de K_{sat} à l'aide du dispositif expérimental

Dès que les phases de validation de la saturation et de consolidation sont terminées, on lance l'essai de conductivité hydraulique avec le module de charge constante (*Constant Head*) à l'aide du logiciel GDS Lab (fig. 8-7). Cet essai permet de maintenir un gradient de pression constant entre le sommet et la base de l'échantillon. En condition de régime permanent, le volume cumulé est enregistré par chaque contrôleur pour ensuite calculer le débit moyen et la densité de flux (éq. 8-6 et 8-5 respectivement).

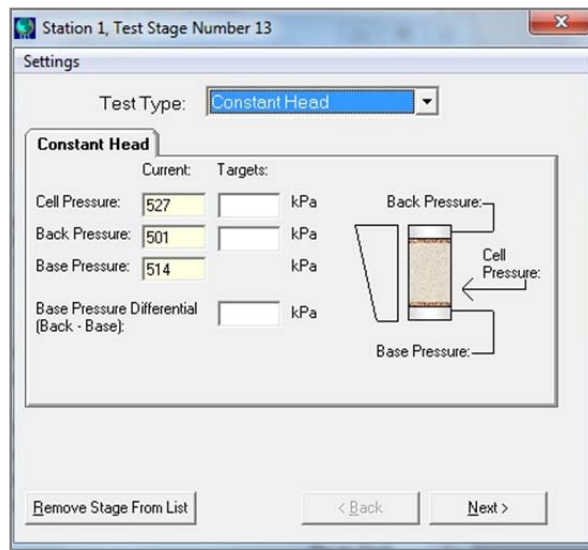


Figure 8- 7 Module pour l'essai de K_{sat} à charge constante (GDS Instruments d'après Sols Mesures, 2008). Back pressure : U_b , Base pressure : U_w

Le module permet d'entrer les pressions souhaitées aux extrémités de l'échantillon et d'enregistrer les faibles variations de pression due aux oscillations ou bruit lors de la mesure. Il permet également de fixer la pression de confinement de la cellule qui sera maintenue pendant l'essai.

Le critère choisi pour imposer le gradient de pression à travers l'échantillon est affiché dans le tableau 8-2. Des gradients de pression élevés pour un échantillon perméable peuvent engendrer des régimes turbulents et donc la loi de Darcy peut alors être mise en défaut.

Tableau 8- 2 Gradient maximal à imposer (Chossat, 2005).

Conductivité hydraulique attendue (m/s)	Gradient recommandé (cm/cm)
10^{-5} à 10^{-7}	5
10^{-7} à 10^{-9}	20
$<10^{-9}$	50

Dans le graphique des volumes cumulés en fonction du temps (fig. 8-8), le régime permanent est atteint lorsque les pentes des deux lignes (débit en amont et aval) sont égales, au signe près, et constantes au cours du temps.

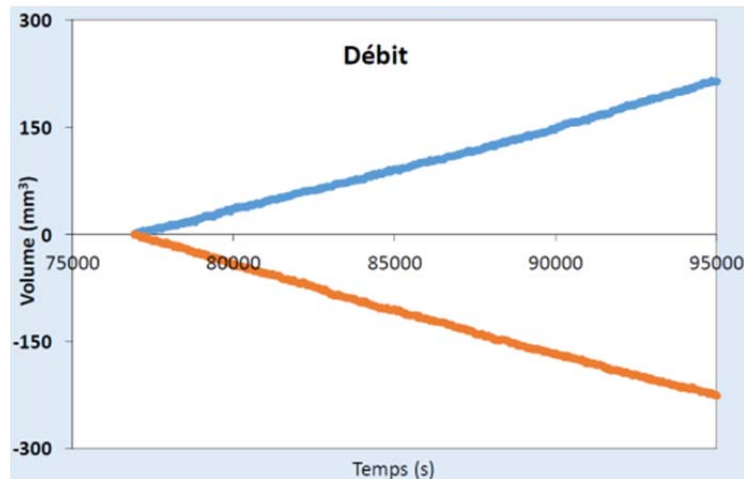


Figure 8- 8 Volume à l'entrée (rouge) et en sortie (bleu) de l'échantillon en régime permanent.

Le régime d'écoulement laminaire peut être vérifié à l'aide du nombre de Reynolds, R_e , calculé avec l'équation suivante :

$$R_e = \frac{\rho_w \bar{q} L}{\mu_T} \quad \dots(8-13)$$

Les valeurs de R_e pour un écoulement laminaire sont inférieures à 1.

La durée d'un essai de conductivité hydraulique à saturation peut varier de plusieurs heures à un jour selon le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent.

8.1.2. Roches calcaires dures

La procédure de mise en place de l'éprouvette sur le piédestal est très similaire à celle utilisée pour les matériaux meubles. Cependant, l'échantillon de roche est préalablement saturé à l'aide du même système à vide utilisé pour la saturation de la céramique (fig. 8-9). L'échantillon de roche est saturé pendant une semaine avant de le mettre dans la cellule.



Figure 8- 9 Saturation par capillarité des échantillons de roches calcaires dures.

Les étapes de saturation ne sont pas nécessaires. Dans ce fait, la validation de la saturation avec l'algorithme de Skempton (B_w) et la consolidation ne sont pas faites, car la déformation de l'échantillon est négligeable (impossible à valider avec B_w). L'échantillon, après la saturation par capillarité sous vide, il est passé directement dans la cellule pour la mesure de conductivité hydraulique saturée avec le module « constant head » décrit précédemment.

8.2. Mesure des propriétés hydriques en condition non saturée

Après avoir fini les mesures de la conductivité hydraulique à saturation, l'étape suivante est la mesure des caractéristiques de rétention en eau et de conductivité hydraulique non saturée de l'échantillon.

8.2.1. Schéma du dispositif

La configuration du système d'injection et de contrôle de la pression pendant la méthode transitoire du débit d'extraction (fig. 8-10) est différente à celle de l'essai à saturation (fig. 8-1). L'essai consiste à injecter par palier de l'azote avec une pression U_a connue dans l'échantillon via le chapeau drainant et à recueillir le débit sortant par la base à une pression d'eau U_w connue et constante. A chaque incrément de pression ou étape, la pression de la cellule σ_3 est elle aussi, augmentée, en maintenant l'écart avec U_a . La succion dans l'échantillon est donc la différence entre U_a et U_w avec $U_a > U_w$. Le paramètre U_w est corrigé (U'_w) de l'effet d'impédance hydraulique de la céramique.

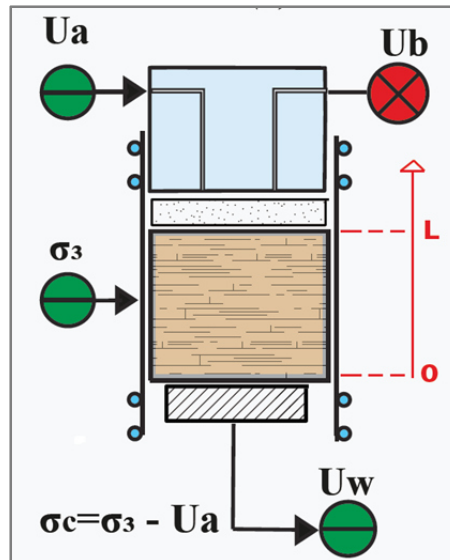


Figure 8- 10 Schéma du dispositif expérimental pour l'essai en non-saturé . U_a : pression d'air dans le pores, U_b : pression d'eau dans le pores au sommet de l'échantillon, σ_3 : pression d'eau dans la cellule, U_w : pression d'eau dans le pores à la base de l'échantillon.

8.2.2. Etapes de l'essai transitoire (essai multistep)

L'étape préalable à l'essai du débit d'extraction est l'étape d'équilibre où sont établies les conditions initiales du système.

8.2.2.1 Equilibre hydrique

Après la fin de la mesure de K_{sat} , le protocole à suivre pour enchaîner avec l'essai $K(\theta)$ est le suivant.

La pression d'eau au sommet de l'échantillon (U_b) est augmentée à la même valeur de celle qui a été appliquée dans la base de l'échantillon (U_w) pendant l'essai K_{sat} , de sorte à imposer un gradient de pression nul dans l'échantillon. L'échantillon est alors en équilibre hydrostatique et les flux en entrée et en sortie sont nuls. Le critère d'équilibre hydrique est l'absence d'écoulement de la base vers le haut de l'échantillon. Pour réduire la durée du test, la condition suivante est appliquée:

$$Si \quad \Delta V \leq 20 \text{ mm}^3 \dots t: [0,1]_{hr}, \text{ le système est en équilibre hydrostatique}$$

Pendant cet essai, la vanne liée au CPV d'azote (fig. 7-1 et 8-10) est fermée pour ne pas désaturer l'échantillon. Elle sera mise en route pendant l'essai transitoire par la suite. Seules les vannes liées aux CPV au niveau de la céramique (base de l'échantillon) et de la

cellule restent ouvertes. La vanne liée au CPV côté chapeau est de préférence fermée. Dans ce cas-là, ça sera le CPV base qui sera le seul à équilibrer la pression dans l'échantillon. Si l'on veut vérifier la pression en haut de l'échantillon, il suffit d'ouvrir la vanne côté chapeau drainant et regarder la variation de pression du CPV. Elle ne devrait pas changer si l'échantillon est en équilibre hydrostatique. Après d'avoir vérifié l'étape d'équilibre expliquée ci-dessus, le système est prêt pour lancer un premier palier de suction.

8.2.2.2 Déroulement de l'essai

Les contrôleurs fonctionnels pendant cette étape sont le CPV azote, le CPV base et le CPV cellule (fig. 7-1 et 8-10). Le potentiel matriciel dans l'échantillon est contrôlé par la pression d'azote (U_a) imposée par le CPV azote et la pression de l'eau (U_w) dans les pores imposée par le CPV base. Le confinement est appliqué par la différence entre la pression dans la cellule σ_3 imposée par le CPV cellule et la pression d'azote U_a , à la différence de l'essai K_{sat} où le confinement correspond à la différence entre la pression de l'eau à l'interface céramique-échantillon U_w et σ_3 . La pression de confinement sera exprimée par $\sigma_c = \sigma_3 - U_a$, et le potentiel matriciel par $h = U'_w - U_a$.

Une fois l'étape d'équilibre validée, on établit la condition initiale et aux limites pour l'essai non saturé :

Condition initiale

$$\begin{aligned} \text{i)} \quad & h(z, 0) = 0, \text{ avec } 0 \leq z \leq L \\ & q(z, 0) = 0, \text{ avec } 0 \leq z \leq L \end{aligned}$$

Condition à la limite inférieure

$$\begin{aligned} \text{ii)} \quad & h(0, t)_1 = (U'_w - U_{a_1}) = h_1, \quad \text{avec } h_1 < 0 \quad \forall \quad 0 < t \leq t_1 \\ & h(0, t)_i = (U'_w - U_{a_i}) = h_i, \quad \text{avec } h_i < h_{i-1} \quad \forall \quad t_{i-1} < t \leq t_i \\ & h(0, t)_n = (U'_w - U_{a_n}) = h_n, \quad \text{avec } h_n < h_{n-1} \quad \forall \quad t_{n-1} < t \leq t_n \end{aligned}$$

Condition à la limite supérieure

$$\text{iii)} \quad q(L, t) = 0 \quad \forall \quad 0 \leq t \leq t_n$$

L'interface céramique-échantillon correspond à $z=0$ tandis que le sommet de l'échantillon correspond à $z=L$ (fig. 8-10). La première condition exprime l'état

d'équilibre initial dans un milieu monophasique saturé en eau. La seconde condition exprime les différents paliers de succion imposés à l'échantillon. La troisième condition correspond à l'absence de flux à la limite supérieure de l'échantillon (CPV-haut fermé). L'essai se déroule par paliers ou étapes successives, dont le nombre n , les valeurs de potentiel matriciel correspondantes h_i et les durées ont été établies selon des critères liés à la texture, à la distribution de taille de pores et au PEA du matériau.

A partir du premier palier, à chaque incrément de pression (changement d'étape), il faut fermer la vanne d'injection d'azote et la vanne d'injection d'eau dans la cellule jusqu'à ce que le CPV d'azote atteigne la pression d'injection voulue. Cela évite que le CPV cellule, qui augmente la pression beaucoup plus vite que le CPV azote, ne déforme l'échantillon à cause d'une consolidation σ_c très forte juste après le changement d'étape.

Les échantillons sont classés en deux groupes. Le premier groupe correspond aux échantillons avec une texture fine (argileuse ou limoneuse). Le deuxième groupe correspond aux échantillons de roches et aux échantillons meubles ayant une texture plutôt grossière (sable fin, sable grossier). Les échantillons du premier groupe sont soumis à une première succion liée à un PEA moyen estimé par la méthode du porosimètre à mercure à environ 20 cm H₂O (2 KPa). Les paliers de succion suivants sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8- 3 Etapes ou paliers de succion de l'essai non saturé. Les valeurs sont indicatives.

	Paliers de succion en cmH ₂ O							
	1ere	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme	7eme	optionnel
Argiles, limons	20	60	100	150	200	330	600	900
Sable, roches	10	30	60	90	120	150	200	400

Etant donné que l'évolution de la courbe de rétention en eau pour le premier groupe d'échantillons est plus développée dans la gamme de succion au-delà de 100 cm, il est nécessaire d'aller jusqu'à 1000 cm pour avoir une bonne connaissance de leurs propriétés de rétention et donc plusieurs paliers sont lancés entre 100 et 1000 cm (tab. 8-3). Cependant il est déconseillé par le fabricant de la céramique d'aller jusqu'à 1000 cmH₂O (100 KPa) de succion, car il y a un risque de dépasser le PEA de la céramique. On garde donc un écart de 100 cm par sécurité. Pour les échantillons avec de roches et de

texture grossière, la courbe est développée presque entièrement entre 0 et 200 cm H₂O de succion (tab. 8-3). Le palier de 400 cm est rarement nécessaire sauf pour les roches. Chaque étape est lancée à l'aide du module GDS en fixant la pression d'eau interstitiel (CPV base) et en mesurant le volume écoulé grâce au déplacement du piston à pression constante. La durée de chaque étape peut varier de plusieurs heures à 24 et parfois 48 heures. Le critère choisi pour passer à une autre étape est un débit d'eau en sortie <50 mm³/h (cela correspond à une densité de flux de $1,3 \cdot 10^{-2}$ mm/h), le même que celui établi par Eching et al. (1994).

8.2.2.3 Paramètres suivis pendant l'essai

Le paramètre le plus important à suivre tout au long de l'essai est le volume d'eau à la sortie de la céramique, pour deux raisons: la première, c'est qu'il faut mesurer le débit d'extraction étant donné que c'est l'objectif de cette technique. La deuxième raison est qu'il faut surveiller une possible apparition de bulles, exprimée par l'apparition de pics de débit incohérents avec l'allure de la courbe. Cela est lié à l'expansion de l'air à la sortie de la céramique ou aux changements de température dans les réservoirs des CPV. Il faudra en ce cas appliquer les corrections de volume nécessaires.

Les variations de volume dans la cellule permettent de faire des calculs de variation de volume de l'échantillon au long de l'essai par rapport à son état initial. Etant donné que l'échantillon est soumis à des conditions de confinement qui s'approchent des conditions de terrain, il peut y avoir également une légère déformation qu'il faut suivre pour avoir une idée de la réduction de la porosité naturelle.

L'enregistrement des valeurs de pression en haut et en bas de l'échantillon sert à corriger les pertes de charge dans l'ensemble échantillon-céramique liées à l'impédance créée par la céramique poreuse et, en moindre proportion, par la pierre poreuse située au-dessus de l'échantillon.

8.2.2.4 Démontage de l'échantillon

Pour le démontage de l'échantillon à la fin de l'essai, plusieurs aspects sont à prendre en compte. La décompression ne doit pas se faire instantanément, car l'expansion du gaz

dans l'échantillon est beaucoup plus rapide que l'expansion de l'eau dans la cellule. Donc pour éviter l'explosion ou la rupture de la membrane, les valeurs de pression sont descendues graduellement en fonction de la vitesse de décompression du CPV azote. Le pilotage se fait manuellement en surveillant les trois contrôleurs en même temps. Pendant la décompression, la pression de la cellule doit rester supérieure à la pression d'azote pour éviter le gonflement de la membrane et la pression de la céramique reste inférieure à la pression d'azote pour éviter que l'eau de la céramique ne retourne vers l'échantillon.

A la fin de l'essai, l'échantillon est démonté pour faire les pesages nécessaires. Une fois l'échantillon démonté, la membrane est soigneusement enlevée pour faire le pesage de l'échantillon humide. La pierre poreuse (M_{p-f}), les papiers filtres (M_{f-f}) et la pâte de silice (M_{si-f}) sont également pesés pour faire les corrections du volume d'eau extrait. Les contributions au volume d'eau liées à la désaturation de la pierre poreuse et des billes de verre ne sont pas négligeables. Ce protocole de pesage doit se faire soigneusement et de façon immédiate après le démontage pour éviter l'évaporation de l'eau.

Finalement, l'échantillon est mis à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures pour avoir sa masse sèche. Ces mesures de masse vont permettre de faire les calculs finaux des propriétés hydriques des échantillons de la ZNS.

8.2.2.5 Calculs

L'essai transitoire multi-step outflow permet donc de mesurer le volume d'eau cumulé issu de l'échantillon en fonction du temps à différents états de saturation et de succion de l'échantillon. Cela permet de calculer les deux caractéristiques hydriques les plus importantes liées au transport dans la ZNS : les courbes de rétention en eau $\theta(h)$ et de conductivité hydraulique $K(\theta)$.

Cependant, il faut faire certaines corrections pour avoir de bonnes valeurs et diminuer les biais expérimentaux, comme par exemple la prise en compte de la contribution volumique de l'eau contenue de la pierre poreuse et dans la pâte de silice et de l'impédance hydraulique de la pierre et de la céramique poreuse.

8.2.2.5.a) Calculs de la teneur en eau de l'échantillon

La courbe de rétention de l'eau dans l'échantillon s'exprime à travers la relation entre la teneur en eau volumique, θ , et le potentiel matriciel du milieu poreux, h . La succion est connue, car on l'impose pendant l'essai du débit d'extraction. θ est calculée selon la relation mathématique suivante:

$$\theta_i = \left[\frac{(M_{wT}) - (\sum V_{wi})}{(M_d)} \right] \times \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad \dots(8-14)$$

où θ_i est la teneur en eau volumique à l'état i , M_{wT} est la masse totale d'eau stockée par l'échantillon à saturation, M_d est la masse de l'échantillon sec mesurée après le séchage à 105°C, $\sum V_{wi}$ est le volume d'eau cumulé à la sortie de l'échantillon entre la saturation et la fin de l'étape i (corrigé si besoin), ρ_w est la masse volumique de l'eau (1 g/cm³), ρ_b est la masse volumique de l'échantillon sec mesurée après le séchage à 105 °C.

8.2.2.5.b) Corrections volumiques appliquées aux calculs de l'essai multistep

On a :

$$M_{wT} = M_{ex} + M_{ret} \quad \dots(8-15)$$

où M_{ret} est la masse d'eau restant dans l'échantillon à la fin de l'essai et M_{ex} est la masse d'eau cumulée sortie de l'échantillon pendant tout l'essai transitoire.

M_{ex} doit être corrigée car elle est influencée par les contributions massiques de la pierre poreuse (M_{p-ex}), de la pâte de billes de verre (M_{si-ex}) et des papiers filtre (M_{f-ex}) pendant le drainage tout au long de l'essai. Dans ce sens, M_{ex} est corrigée selon:

$$M_{ex-cor} = M_{ex} - M_{p-ex} - M_{si-ex} - \varepsilon \times M_{f-ex} \quad \dots(8-16)$$

$$M_{p-ex} = M_{p-sat} - M_{p-f} \quad \dots(8-17)$$

où M_{p-ex} est la masse d'eau drainée par la pierre poreuse, M_{p-sat} est la masse totale de la pierre saturée, M_{p-f} est la masse totale de la pierre humide à la fin de l'essai, M_{si-ex} est la

masse d'eau drainé par la pâte à silice, M_{f-ex} est la masse d'eau drainée par un papier filtre, $(0,3 \pm 0,01 \text{ g})$, ε est le nombre de filtres placés dans l'ensemble du dispositif.

M_{si-ex} est calculée en fonction de la pesée de la pâte à fin de l'essai et de sa teneur en eau volumique à saturation :

$$M_{si-ex} = \frac{(\theta_{si-sat} * M_{si-d} * \rho_{eau})}{\rho_{si-d}} - M_{si-f} \quad \dots(8-18)$$

où θ_{si-sat} est la teneur en eau volumique à saturation des billes de verres ($0,471 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) calculée expérimentalement, M_{si-d} est la masse de billes de verre après séchage à 105°C , ρ_{si-d} est la masse volumique sèche des billes de verre ($1,46 \text{ g/cm}^3$) calculée expérimentalement, M_{si-f} est la masse de la pâte des billes de verre à la fin de l'essai transitoire.

Dans la figure 8-11 ci-dessous, on peut apercevoir l'ensemble de l'échantillon pendant le démontage. Toutes les corrections précédentes sont importantes pour qu'il n'y ait pas de surestimation des valeurs de rétention en eau de l'échantillon. La correction de volume cumulé (V_{wi-c}) est effectuée pour chaque étape i (eq. 8-19) Cette façon de faire permet d'éviter la surestimation des volumes extraits. En revanche, il est possible que la forme de la courbe de drainage soit légèrement altérée, notamment pendant les étapes proches à la saturation.

$$V_{wi-c} = \frac{M_{ex-corr}}{M_{ex}} \times V_{wi} \quad \dots(8-19)$$

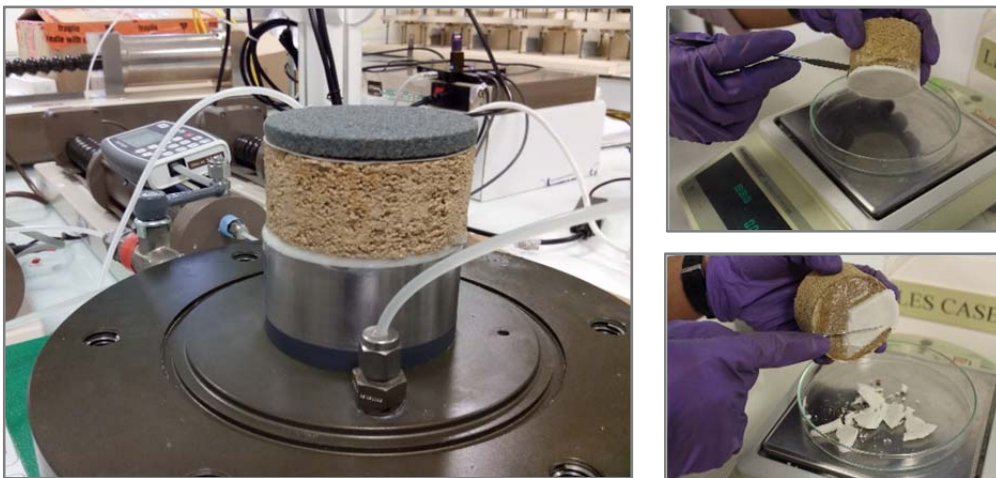


Figure 8- 11 Ensemble de l'échantillon (gauche) et pesage de la pâte à silice après le démontage (droite)

8.2.2.5.c) Calculs de la conductivité hydraulique non saturée

Le calcul de la conductivité hydraulique non saturée (cm/h) est fait à l'aide des équations de Gardner (1956). L'équation 8-20 permet de calculer $K(h)$ à partir des données expérimentales :

$$K(h_i) = \frac{B \times \Sigma V_{wi-c}}{V_e \times h_i \times \alpha_G^2} \quad \dots(8-20)$$

avec

$$\alpha_G = \frac{\pi}{4L} \quad \dots(8-21)$$

où B (h^{-1}) est la pente de la courbe qui relie le logarithme de $(\Sigma V_{wi-c} - V_{i(t)})$ en fonction du temps pendant l'étape de succion i , ΣV_i est le volume total d'eau cumulé en sortie de l'échantillon pendant l'étape i (cm^3), $V_{i(t)}$ est le volume cumulé pendant l'étape i au temps t (avec $V_{i(t)} \leq \Sigma V_i$), V_e est le volume total de l'échantillon (cm^3), h_i est le potentiel matriciel de l'échantillon pendant l'étape de succion i (cm), α_G est un paramètre qui est fonction de la hauteur L de l'échantillon (cm^{-1}).

8.2.2.6 Suivi de la variation de volume de l'échantillon

La méthode du débit d'extraction appliquée au système triaxial peut modifier le volume de l'échantillon si un protocole de confinement n'est pas établi. Cependant, il y aura toujours une déformation de l'échantillon, qui peut être négligeable ou pas.

La variation du volume d'un sol non saturé peut être exprimée en fonction de la contrainte appliquée ou des variations des proportions des phases du matériau (phases mobiles et phase solide). L'indice des vides, e , est utilisé pour représenter l'état de déformation du matériau (Barbour et al., 1998). Par définition, l'indice de vides est décrit comme le rapport entre le volume de vides, V_v , et le volume total de la phase solide, V_s (Craig, 2005) :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots(8-22)$$

Pour faciliter les calculs, on considère que l'eau se comporte comme un fluide incompressible (si l'eau est complètement désaérée), dans les pores et aussi dans la cellule, et d'ailleurs on considère que les variations de volume sont dues uniquement au mouvement de la phase solide du matériau.

Pour faire un suivi de la variation de volume d'un échantillon, l'indice de vides peut être présenté en fonction du potentiel matriciel imposé ou en fonction du degré de saturation, S_e (fig. 8-12). La figure ci-dessous montre une courbe caractéristique de l'évolution du volume de l'échantillon pendant un essai en condition non saturée, exprimée par l'évolution de l'indice de vides, e , en fonction de l'indice d'eau, S_e .

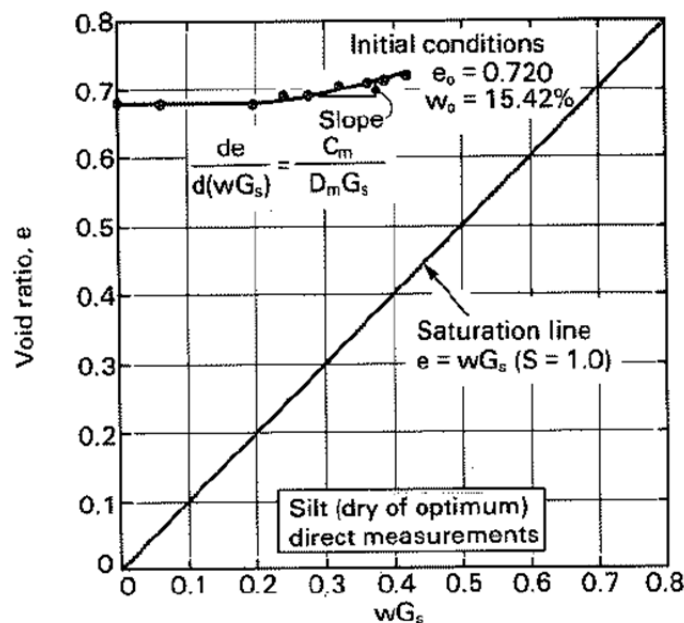


Figure 8- 12 Résultat d'un essai drainage d'un sédiment de texture limoneuse (Barbour et al., 1998).

L'indice e et la porosité Φ sont liés selon l'équation suivante :

$$\Phi = \frac{e}{1 + e} \dots(8-23)$$

On définit l'indice de saturation en eau (§3.3), S_e , par l'équation suivante:

$$S_e = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w * G_s}{e} \quad \dots(8- 24)$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \dots(8- 25)$$

où V_w est le volume d'eau dans l'échantillon, w est la teneur en eau gravimétrique, G_s est le poids spécifique du matériau. V_v est calculé en fonction de la variation de volume d'eau dans la cellule :

$$V_v = V_T - V_s - V_c \quad \dots(8- 26)$$

où V_c est le volume d'eau injecté dans la cellule à partir de $t=0$, lors de l'essai du débit d'extraction.

CHAPITRE 9: AUTRES METHODES EXPERIMENTALES

9.1. Propriétés physiques

9.1.1. *Distribution de taille des grains*

9.1.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

La distribution de la taille des particules solides des matériaux de la ZNS a été déterminée au laboratoire d'ANTEA à l'aide de la méthode normalisée NF P 94-056 (AFNOR, 1996) pour la fraction inférieure à 100 mm et supérieure à 0,08 mm. Pour les particules de taille inférieure à 80 μm (0,08 mm), l'analyse granulométrique est faite par sédimentométrie. Les analyses ont été faites sur la totalité de la matière, sans décarbonatation.

La technique par tamisage consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau et à le fractionner, une fois séché à température contrôlée (105 °C pour les sols n'ayant pas de minéraux gonflants ; 50 °C pour les sols sensibles ayant de minéraux argileux gonflants), au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus sur chaque tamis. La masse de refus cumulée est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon. L'essai a été fait sur les faciès meubles de la ZNS. La granulométrie des matériaux rocheux n'a pas été réalisée vu leur état de dureté et leur cimentation.

9.1.1.2 Analyse granulométrique par sédimentation

Cette méthode permet de déterminer la distribution massique des particules fines de taille inférieure à 80 μm . L'essai, réalisé selon la norme NF P 94-057 (AFNOR, 1992), consiste à mesurer la vitesse de décantation des grains dans un milieu liquide au repos. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée au sol pour déterminer le diamètre équivalent des particules. La température de la suspension est également mesurée, pour faire les corrections de viscosité dynamique.

Les particules inférieures à 80 µm, séparées du reste du sol par tamisage (NF P 94-056), sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant (hexamétaphosphate de sodium) et mises en agitation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. L'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution est mesurée au moyen d'un densimètre à une profondeur d'immersion donnée. La distribution massique de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

L'équation permettant de calculer le diamètre équivalent des plus grosses particules non sédimentées à l'instant t est la suivante :

$$D_k = \left[\frac{1}{g} \times \frac{18\mu}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{H_t}{t} \right]^{1/2} \quad \dots(9-1)$$

où D_k est le diamètre équivalent des particules (m), μ est la viscosité dynamique de la solution à l'instant t (Pa.s), ρ_s est la masse volumique des particules solides mesurée à l'aide d'un pycnomètre (Kg/m³), ρ_w est la masse volumique de l'eau à la température d'essai (Kg/m³), g est l'accélération de la pesanteur (m/s²), H_t est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant t (m), t est le temps écoulé depuis le début de l'essai (s).

9.1.1.3 Paramètres de distribution de taille de grain

Certains paramètres sont calculés à partir des courbes de distribution de taille de grain obtenues. Parmi les plus importants, on trouve :

- $D_{\max}$, la taille de particule la plus grande de la fraction étudiée.
- D_N , la dimension nominale d'ouverture du tamis à maille carrée pour laquelle le pourcentage massique de tamisât est égal à N pour cent (ex : 10 %, 30%, 60%, etc.).
- C_u ou facteur d'uniformité, le rapport des dimensions de maille de tamis pour lesquels il y a respectivement 60 % et 10% de passant. Il est exprimé par D_{60}/D_{10} .
- C_c ou coefficient de courbure, qui donne une idée de la forme de la courbe de distribution. On le calcule par:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = C_u \left(\frac{D_{30}}{D_{60}} \right)^2 \quad \dots(9-2)$$

où D_{30} est le diamètre nominal pour laquelle le pourcentage massique de tamisât est égal à 30%. Des valeurs entre 1 et 3 sont associées à une granulométrie bien graduée.

9.1.2. Capacité d'adsorption du bleu de méthylène

L'essai d'adsorption du bleu de méthylène (BM) a été effectué selon la norme NF P 94-068 (AFNOR, 1998) dans les laboratoires du groupe ANTEA. L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de BM (à une concentration de 10 g/L) pouvant être adsorbée par le matériau (fraction < 5 mm) mis en suspension dans l'eau. Cette valeur est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou la roche.

Pour préparer l'échantillon, environ 50 g de matériau est prélevé et ensuite versé dans un bécher avec 500 cm³ d'eau déminéralisée et homogénéisé à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 10 minutes. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de BM et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleue claire persistante apparaît à la périphérie de la tache (fig. 9-1). Si l'auréole persiste pendant plusieurs minutes (mn), l'essai est terminé et la concentration de BM (cc) retenue est la dernière correspondante au moment de l'apparition de l'auréole. Si l'auréole disparaît au bout de quelques minutes, il faut augmenter légèrement la concentration de BM, relancer le chronomètre et observer à nouveau si l'auréole persiste.

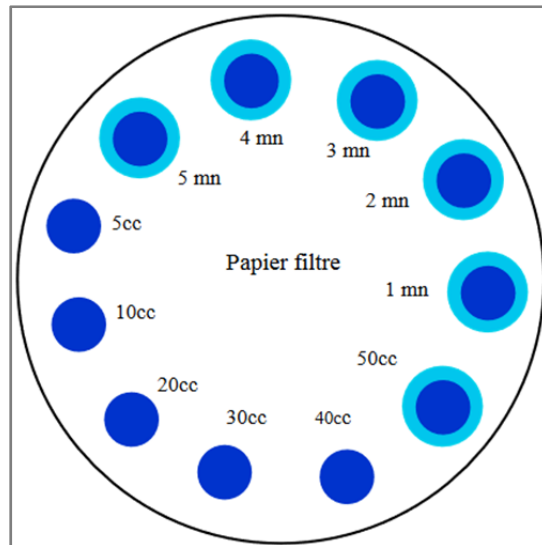


Figure 9- 1 Test qualitatif de BM pour la vérification de la concentration de BM. L'unité cc (cm³ ou mL) représente la concentration en BM et l'unité mn représente les minutes à compter à partir de l'apparition de l'auréole.

Les équations permettant de calculer la capacité d'adsorption de BM du matériau sont les suivantes :

$$VBS = \frac{B_b}{M_d} \times 100 \quad \dots(9-3)$$

$$B_b = 0,01 V_b \quad \dots(9-4)$$

où VBS est la valeur de BM de l'échantillon (g_{BM}/100g_{ech}), B_b est la masse de BM introduite dans la solution (g), M_d est la masse sèche de la prise d'essai (g), V_b est le volume de la solution de bleu utilisé (cm³).

La classification des sols selon la norme NF P94-068 est présentée ci-dessous :

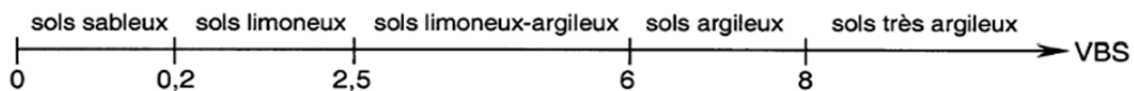


Figure 9- 2 Classification des sols en fonction du VBS selon la norme NF P94-068.

9.1.3. Mesure de la surface spécifique des matériaux

La mesure de la surface des grains a été réalisée par la méthode d'adsorption de molécules d'azote à l'aide d'un dispositif Quantachrome modèle NOVA 22000^e. Cette méthode a été choisie parce que la molécule d'azote N₂ est non-polaire et n'interagit pas avec l'espace interfoliaire des minéraux gonflants et donc elle apporte une mesure de la surface externe du matériau (Pennell, 2016).

Le protocole de préparation des échantillons consiste à sécher à l'air le matériau pendant 24 heures et à le tamiser avec un tamis d'ouverture égale à 2 mm. Les échantillons tamisés sont ensuite chauffés à 105 °C. Environ 2 g de matériau sont utilisés pour l'analyse. La méthode de mesure consiste à placer l'échantillon dans une cellule en verre laquelle est ultérieurement désaérée sous vide à 105 °C pendant 12 heures. Ensuite, la cellule portant l'échantillon est immergée dans un réservoir d'azote liquide pour fixer la température de l'échantillon constante à 77° K (soit -196,15 °C) pendant l'essai. L'azote sous forme de gaz est finalement injecté dans le tube contenant l'échantillon. La pression de vapeur relative et le volume d'azote injecté par gramme d'échantillon dans la cellule sont enregistrés pour calculer la surface spécifique du matériau à l'aide d'un modèle d'adsorption. Le logiciel couplé à la machine est NOVAWin™.

Le type de courbe décrite par les processus d'adsorption et de désorption isothermes peut être identifié selon la classification établie par l'IUPAC (Sing et al., 1985). Selon cette classification, les courbes sont regroupées en six types différents (fig. 9-3-a). Seuls types II et IV sont concernés par cette étude.

L'isotherme réversible de type II décrit la forme classique obtenue avec un matériau adsorbant peu poreux ou macroporeux. La courbe représente une adsorption illimitée de couches d'azote. Le point B est considéré comme le moment du remplissage de la première couche d'azote sur la surface du matériau adsorbant.

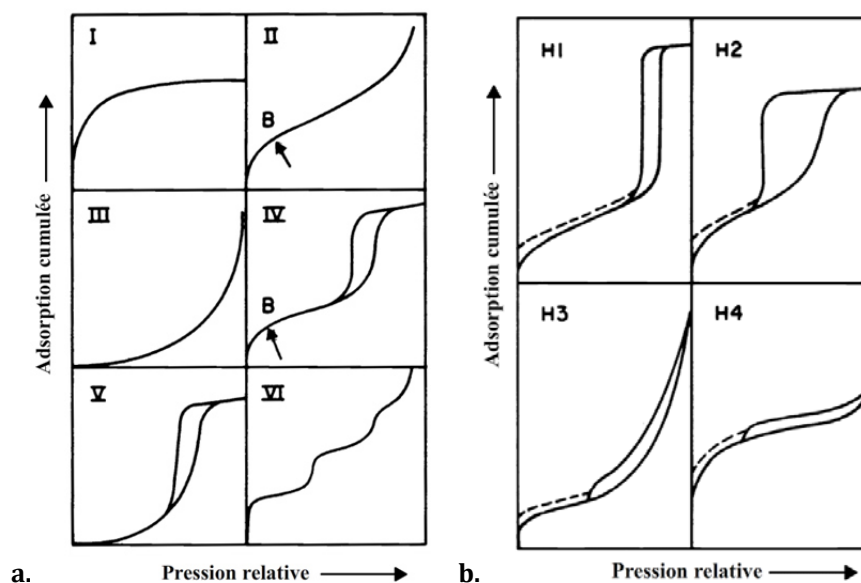


Figure 9- 3 Classification IUPAC des courbes d'adsorption isothermes (Sing et al., 1985).

Le type IV est une adsorption qui nécessite une énergie relativement élevée. Une caractéristique particulière est la boucle d'hystérésis, associée à la condensation capillaire au niveau des mésopores (fig. 9-4). Le tableau 9-1 présente la gamme de taille de pores dans ce contexte-là. La partie initiale de la courbe est attribuée à l'adsorption de couches d'azote, de la même façon que celle décrite par le type II. La figure 9-4 présente les étapes d'adsorption des molécules d'azote dans les mésopores.

L'hystérésis observée dans le type d'adsorption IV est associée à la géométrie des pores de l'échantillon. Une classification des différents types d'hystérésis a été établie également par l'IUPAC (fig. 9-3-b). Plus la distribution de tailles de pores est large, moins la boucle est étroite.

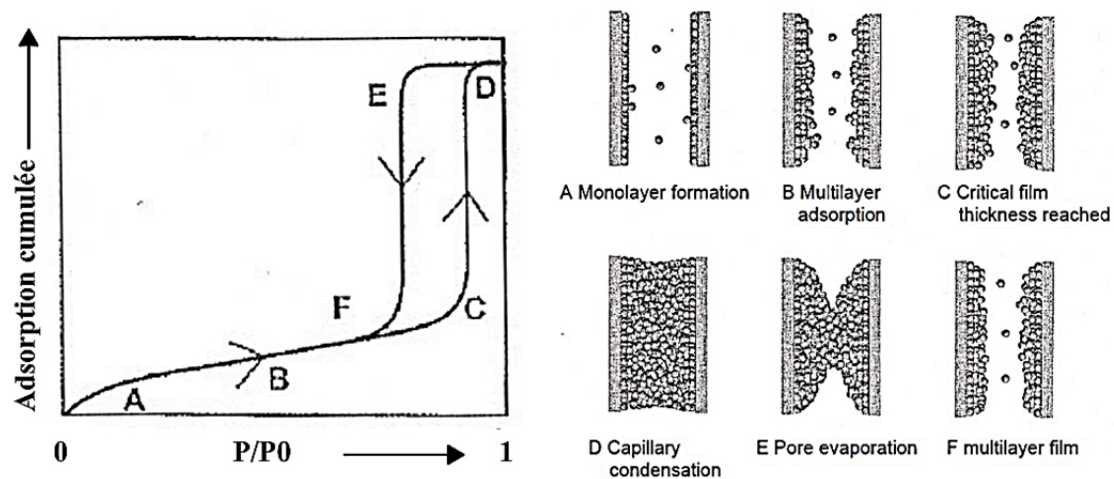


Figure 9- 4 Etapes du processus de sorption isotherme en présence de mésopores (Sing et al., 1985).

Tableau 9- 1 Classification de taille de pores selon l'IUPAC (Sing et al., 1985)

Classification IUPAC	Taille de pore (nm)
Micropores	< 2
Mésopores	2 - 50
Macropores	> 50

Le type d'hystérésis H1 correspond à des pores cylindriques bien définis. Le type H2 est associé aux pores n'ayant pas une géométrie homogène, présentant des obstructions. Le type H3 est lié à un échantillon ayant des pores avec une géométrie en forme de fissures (« *slit-like pores* »). La boucle de type H4 est associée à la présence de pores ayant une géométrie en forme de fissure aplatie (« *narrow slit-like pores* »).

9.1.3.1 Modèle BET

A partir des données brutes (pression relative de vapeur en équilibre (P/P_0) et volume d'azote adsorbé V_{ad}), deux modèles d'adsorption sont utilisés. D'abord, l'équation de Brunauer, Emmett et Teller (BET) a été appliquée pour calculer la surface spécifique totale du matériau (éq. 9-5). L'application du modèle BET est limitée aux isothermes de type II et IV.

$$\frac{1}{V_{ad} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \left(\frac{1}{V_m \times C_0} \right) + \left(\frac{C_0 - 1}{V_m \times C_0} \right) \times \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \dots(9-5)$$

où V_m est le volume de la première couche d'azote adsorbé par gramme d'échantillon (cm^3/g), et C_0 , un coefficient adimensionnel lié à l'état d'énergie du système.

La représentation graphique de l'équation 9-5 est une ligne droite ayant comme ordonnée la partie gauche de l'équation et l'abscisse représentée par (P/P_0) . La gamme de valeurs (P/P_0) est limitée à 0,05-0,35. La pente et l'intersection à l'origine de la droite permettent de calculer les paramètres V_m et C_0 . La surface spécifique totale, exprimée en m^2/g , est calculée selon l'équation 9-6:

$$S_{BET} = W_m \left(\frac{N \times A_{cs}}{M_m} \right) \quad \dots(9-6)$$

avec

$$W_m = V_m \times \rho_{N_2} \quad \dots(9-7)$$

où W_m est la masse de la première couche d'azote adsorbée par la phase solide (g/g), N est le numéro d'Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), M_m est la masse molaire de l'azote (28,02 g/mol), A_{cs} est la surface transversale d'un arrangement hexagonal de la couche monomoléculaire d'azote à 77 K ($1,62 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$) et ρ_{N_2} la masse volumique de l'azote en conditions standards ($1,25 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$).

9.1.3.2 Modèle V-t

Le deuxième modèle est le modèle V-t (éq. 9-8) qui permet de déterminer le volume de micropores en présence d'une mésoporosité (Quantachrome Instruments, 2012). Le modèle V-t est une fonction linéaire de l'épaisseur t_A (Å) de la première couche adsorbée. Cette épaisseur est calculée selon l'équation suivante:

$$t_A(\text{Å}) = 10 \sqrt{\frac{0,1399}{0,0034 - \text{Log}\left(\frac{P}{P_0}\right)}} \quad \dots(9-8)$$

La représentation graphique du modèle est une fonction reliant V_{ad} à t_A . La gamme de pression relative considérée ($0,98 \geq P/P_0 \geq 0,4$) est supérieure à celle de la méthode BET, ce qui permet de calculer la surface spécifique externe avec l'équation 9-9 ci-dessous :

$$S_t = (15,47) \times \left(\frac{V_{ad}}{t_{(\text{Å})}} \right) \quad \dots(9-9)$$

Le facteur 15,47 est une conversion du volume de gaz en volume liquide. L'ordonnée à l'origine i dans la figure 9-5 est associée au volume de micropores V_{MP} (fig. 9-5-b). Si on la multiplie par le facteur 0,001547, on obtient le volume de micropores V_{MP} (cm³) (eq. 9-10).

$$V_{MP} = i \times 0,001547 \quad \dots(9-10)$$

Selon la représentation graphique du modèle V-t, il y a trois types de courbes qui peuvent être obtenues selon les types de pores présents dans l'échantillon (fig. 9-5).

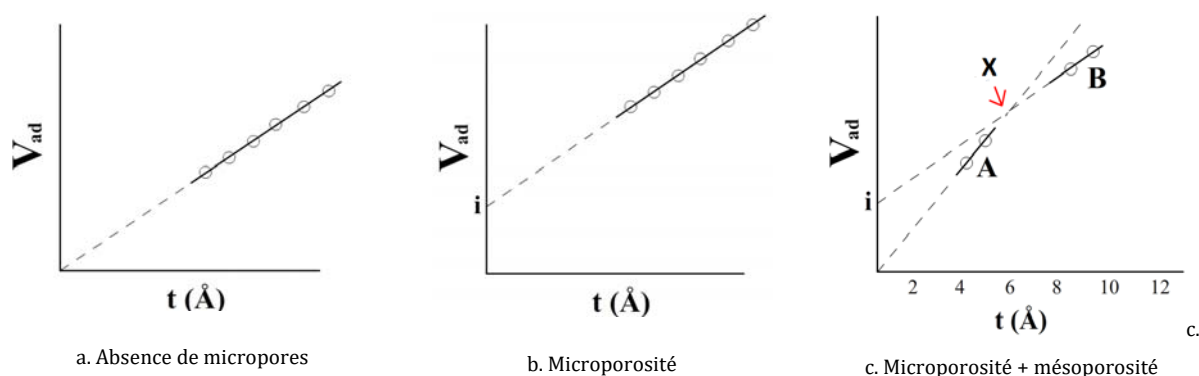


Figure 9-5 Courbes obtenues à l'aide du modèle V-t pour différents types de matériaux (Quantachrome Instruments, 2012).

Dans la figure 9-5-a, la courbe a une ordonnée à l'origine nulle et donc l'échantillon ne possède pas de microporosité. Dans ce cas-là, la valeur de surface spécifique est proche à la valeur obtenue avec le modèle BET (Quantachrome Instruments, 2012). En présence d'une microporosité, la courbe montre une ordonnée à l'origine non nulle (fig. 9-5-b, c). Pour des diamètres de pores inférieurs à 7  , le volume V_{MP} ne peut pas être calculé avec l'équation 9-9. Dans la figure 9-5-c, deux régions sont observées. La partie A de la courbe permet de calculer la surface spécifique totale de tous les pores. La partie B permet de calculer la contribution des mésopores. La valeur de t_A qui correspond au point d'intersection X est le rayon moyen des micropores. Dans la figure 9-5-c, l'intersection X est   $t_A=6$  , donc le diamètre moyen des micropores est d'environ 12 à. La surface spécifique de micropores est calculée par différence entre la surface calculée avec le modèle BET et la surface calculée avec le modèle V-t, selon l'équation :

$$S_{MP} = S_{BET} - S_t \quad \dots(9-11)$$

9.1.4. Mesure de la porosité et de la distribution de taille des pores

9.1.4.1 Mesure de la masse volumique des grains solides

La mesure de la masse volumique de particules solides (ρ_s) a été effectuée selon la norme NF P 94-054 (AFNOR, 1991), laquelle a pour objet la détermination au pycnomètre à eau de la masse volumique de grains solides de sol et de roche. Le principe consiste à mesurer la masse totale des particules solides par pesage, ainsi que leur volume à l'aide d'un pycnomètre.

Les mesures sont réalisées avec de la matière sèche (50 °C pour les matériaux sensibles à la chaleur ou 105 °C dans le cas contraire). Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides. L'équation suivante permet de déterminer ρ_s :

$$\rho_s = \rho_w \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)} \quad \dots(9-12)$$

où m_1 est la masse du pycnomètre vide, m_2 est la masse du pycnomètre contenant la prise d'essai, m_3 est la masse du pycnomètre, du sol et de l'eau, m_4 est la masse du pycnomètre plein d'eau et ρ_w est la masse volumique de l'eau prise égale à 1000 Kg/m³.

9.1.4.2 Porosité et masse volumique apparente sèche

La porosité efficace et la masse volumique apparente sont mesurées par la méthode de la pesée hydrostatique, qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède. L'essai consiste à mesurer la masse d'un échantillon dans trois conditions : pesage de l'échantillon saturé, pesage de l'échantillon saturé immergé dans l'eau et pesage de l'échantillon sec.

Il est nécessaire que les échantillons ne soient pas désintégrés dans l'eau. Pour les essais avec les échantillons de sols, le pesage dans l'eau n'a pas été fait. Dans ce cas, le volume total de l'échantillon (V_T) a été calculé d'après les dimensions de la trousse coupante avec laquelle l'échantillon a été recarotté (70 mm diamètre x 60 mm de hauteur).

L'échantillon est saturé et après pesé (fig. 9-6-b, c). Eventuellement, pour améliorer la saturation, l'échantillon de roche est saturé à l'aide du système triaxial (fig. 9.6-a) avant de faire le pesage.

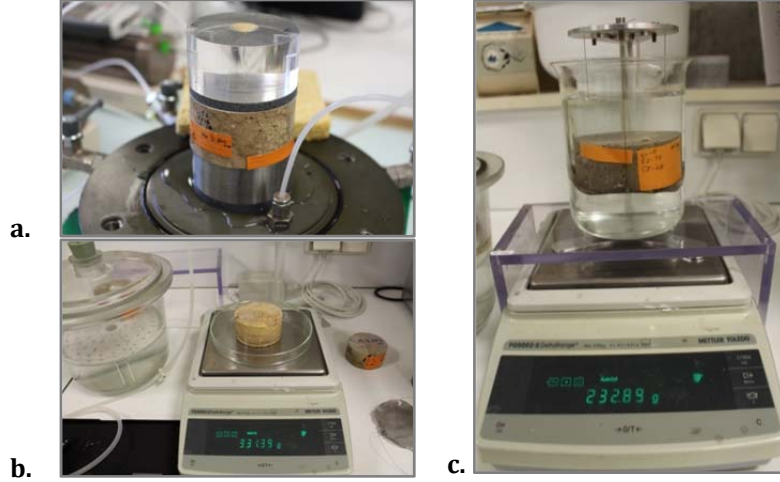


Figure 9- 6 Protocole expérimental pour la mesure de la porosité efficace des échantillons de roche. a) Saturation préalable à l'aide du système triaxial, b) pesage de l'échantillon, c) mesure du poids de l'échantillon immergé.

Ensuite, une pesée hydrostatique de l'échantillon est faite pour mesurer son volume selon le principe d'Archimède (fig. 9-6-c). Enfin, l'échantillon est séché à 105 °C pendant 24 heures, puis pesé pour estimer sa masse sèche. Les calculs de porosité et de masse volumique sont réalisés selon les équations suivantes:

$$\rho_b = \frac{\rho_w \times M_d}{(M_{sat} - M_b)} = \frac{M_d}{V_T} \quad \dots(9-13)$$

$$\Phi_e = \frac{M_{sat} - M_d}{(M_{sat} - M_b)} = \frac{(M_{sat} - M_d)}{V_T \times \rho_w} \quad \dots(9-14)$$

$$\Phi_T = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \dots(9-15)$$

où ρ_b est la masse volumique apparente de l'échantillon (g/cm^3), ρ_w est la masse volumique de l'eau (1 g/cm^3), ρ_s est la masse volumique de particules solides (g/cm^3), M_d est la masse sèche de l'échantillon (g), M_{sat} est la masse de l'échantillon saturé (g), M_b est la masse de l'échantillon saturé immergé dans l'eau (g), V_T est le volume totale de l'échantillon (utilisé pour les échantillons meubles, cm^3), Φ_e est la porosité connectée et Φ_T est la porosité totale de l'échantillon.

Pour les échantillons de roches, les pores saturés sont ceux qui sont uniquement connectés. Il peut y avoir dans ces échantillons des espaces vides isolés (e.g. vacuoles) qui n'ont pas été saturés, ce qui sera à l'origine d'une différence entre porosité totale et porosité efficace. Pour les échantillons meubles, on considère que tous les pores sont connectés, donc que la porosité connectée et la porosité totale sont identiques.

9.1.5. Obtention des courbes de distribution de taille des pores par intrusion de mercure

La caractérisation de la taille des pores des échantillons meubles de la ZNS a été réalisée à l'aide d'un porosimètre à mercure. Le dispositif expérimental utilisé appartient à la série AutoPore IV 9500 de Micromeritics. Il permet d'appliquer différents niveaux de pression à un échantillon immergé dans du mercure. L'appareil est divisé en deux parties : 1) La partie haute, qui sert au dégazage et à appliquer la basse pression et 2) la partie basse, ou chambre à haute pression. L'essai est mené en deux étapes successives.

La pression nécessaire pour que le mercure pénètre dans les pores de l'échantillon est inversement proportionnelle à la taille des pores. La gamme de mesure de taille des pores est comprise entre 0,003 et 1100 μm de diamètre, avec une résolution d'intrusion de 0,1 μL (Micromeritics, 2019).

Le protocole de préparation de l'échantillon est similaire à celui utilisé pour l'analyse de la surface spécifique : séchage à l'air, tamisage à 2 mm et séchage à l'étuve. La quantité de matière utilisée est d'environ 2 grammes.

Le principe de la mesure consiste à faire entrer un liquide non mouillant (le mercure) dans la porosité ouverte de l'échantillon. On fait varier la pression appliquée sur le mercure. On a ainsi la loi suivante :

$$D_p = \frac{4 \sigma_{Hg} \cos(\gamma)}{P_{Hg}} \dots (9-16)$$

où D_p est le diamètre du pore (m), σ_{Hg} est la tension superficielle du mercure dans l'air (0,436 N/m à 20 °C), γ est l'angle de mouillage entre le mercure et la surface de l'échantillon (130°) et P_{Hg} est la pression appliquée sur le mercure (Pa).

Les données obtenues sont exprimées sous la forme d'une courbe représentant le volume d'intrusion de mercure cumulé par gramme d'échantillon (mL/g) en fonction de la pression absolue d'injection de mercure (figure 9-7-a).

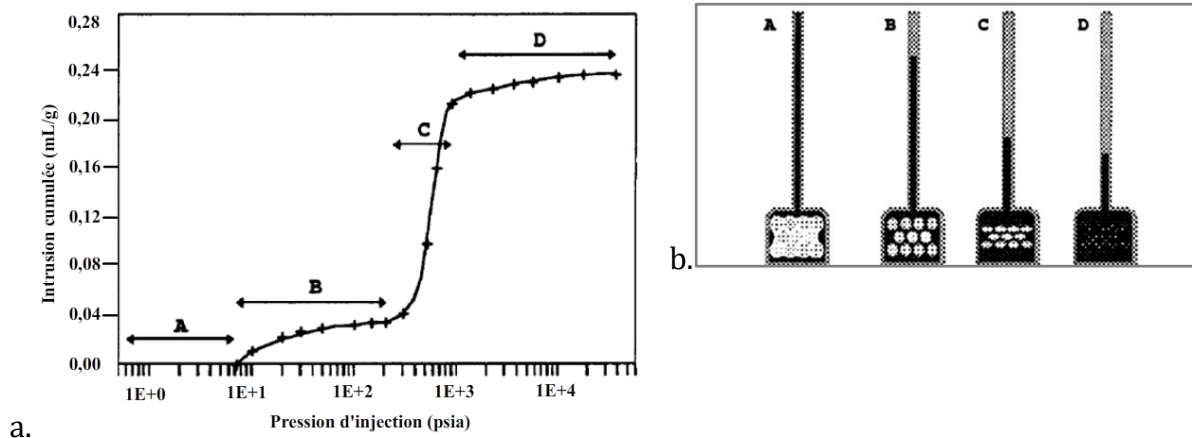


Figure 9- 7 Données brutes obtenues pendant les étapes d'injection du mercure dans l'ensemble pénétromètre-échantillon (Webb, 1993)

La figure 9-7-b montre l'échantillon placé au fond du porosimètre qui est ensuite rempli avec le mercure. L'étape A est liée au remplissage à basse pression (0 à 100 KPa, figure 9-7-a). Ensuite, une rampe de pression est appliquée pour continuer à injecter le mercure (étapes B-C-D, fig. 9-7-b) dans les pores de plus petite taille, ce qui correspond à l'essai à haute pression.

Pour obtenir les courbes de distribution de taille des pores, il faut calculer la différentielle du volume spécifique (l'inverse de la masse volumique) par rapport au logarithme de D_p , $dV/d\log D_p$. L'utilisation du logarithme permet d'éviter un problème d'échelle du diamètre de pores pendant les amplifications dans la gamme des plus faibles tailles de pore (fig. 9-8). Sur la figure, on observe les deux courbes, dV/dD_p et $dV/d\log D_p$, superposées avec la courbe de volume d'intrusion de mercure. On peut constater que la courbe différentielle dV/dD_p n'est pas bien observée sur l'ordonnée pour la plupart des valeurs de diamètre, tandis que la courbe $dV/d\log D_p$ permet de pallier cet effet de compression du graphique.

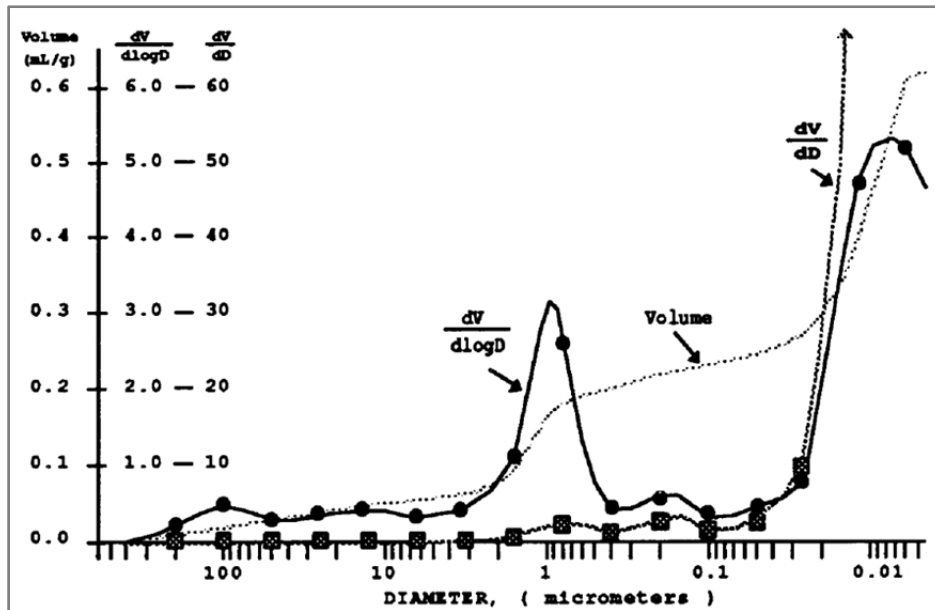


Figure 9- 8 Représentation de la distribution de taille de pores en échelle différentielle et en échelle log différentielle (Webb, 1993).

9.1.6. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasonores dans une éprouvette de roche a été effectuée en s'appuyant sur la norme NF P 94-411 (AFNOR, 2002) dans les laboratoires du groupe ANTEA.

L'essai consiste à émettre une impulsion à la surface d'une éprouvette de roche et à mesurer le temps de propagation de l'onde entre l'émetteur et le récepteur situé à une distance connue. Emetteur et récepteur sont placés sur les faces opposées de l'échantillon. Les échantillons analysés sont les mêmes que ceux passés au système triaxial. Cette mesure a été comparée aux valeurs de porosités connectée et totale, pour avoir une idée de la forme des vides attribués à des pores isolés, soit de type vacuoles, soit de type microfissures, imperceptibles à l'œil nu.

Les deux paramètres principaux calculés sont la vitesse de propagation de l'onde de compression (V_p) et la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement (V_s). Les calculs sont faits avec les équations suivantes :

$$V_p = \frac{L}{t_p} \quad \dots(9-17)$$

$$V_s = \frac{L}{t_s} \quad \dots(9-18)$$

où les vitesses V_p (longitudinale) et V_s (transversale) sont exprimées en m/s, L est la distance entre les points d'application et de mesure de l'onde sonore (m), t_p est la durée de propagation de l'onde de compression dans l'éprouvette (s), t_s est la durée de propagation de l'onde de cisaillement dans l'éprouvette (s).

9.2. Caractéristiques minéralogiques et géochimiques

9.2.1. Caractérisation minéralogique des faciès de la ZNS

La nature minéralogique des matériaux de la ZNS a été étudiée par deux méthodes de laboratoire. Une première caractérisation a été faite par diffraction des rayons X (DRX) et une seconde par imagerie avec un microscope électronique à balayage (MEB). Des analyses complémentaires de la teneur en carbonate et de la teneur en carbone organique ont été également faites.

9.2.1.1 Diffraction des rayons X

Pour la diffraction des rayons X, deux techniques ont été utilisées. Dans un premier temps, des échantillons en poudre non orientée ont été analysés en transmission (montage Debye-Scherrer) pour étudier la minéralogie totale des échantillons. Dans un deuxième temps, la fraction argileuse a été étudiée en réflexion (montage Bragg-Brentano) sous forme de lames orientées.

Les paramètres d'acquisition des deux diffractomètres sont les suivants : i) Géométrie Debye-Scherrer (transmission): Tube RX anticathode, monochromateur avant Co-K α 1,78897 Å. Acquisition de 3-120° 2 θ avec une résolution de 0,03° et temps d'acquisition de 3h30, ii) Géométrie Bragg-Brentano (montage θ - θ): Détecteur solide Lambda Cu-K α 1,540562 Å. Acquisition de 2-64° 2 θ par pas de 0,05° et temps d'acquisition de 3h37.

La préparation de l'échantillon en poudre s'est faite à partir des échantillons issus des carottages, préalablement séchés. Après le séchage, le matériau a été broyé et tamisé avec un tamis d'ouverture de 50 μ m pour homogénéiser la poudre. Les échantillons ont été analysés sans et avec décarbonatation, car la présence de carbonates peut être tellement forte qu'elle empêche la détection des autres phases présentes dans le matériau. Avant l'élimination des carbonates, un traitement d'oxydation de la matière

organique avec du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) a été effectué uniquement pour les échantillons de sol. Une solution acide (pH 5) à base d'acétate de sodium et d'acide acétique a été préparée pour la décarbonatation (figure 9-9-a). Après décarbonatation, les échantillons ont été rincés cinq fois pour éliminer les sels résiduels. Finalement, la fraction décarbonatée (fig. 9-9-b) a été utilisée pour déterminer la minéralogie totale en poudre sans carbonates et pour l'analyse de la fraction infra 5 μm en lame orientée.

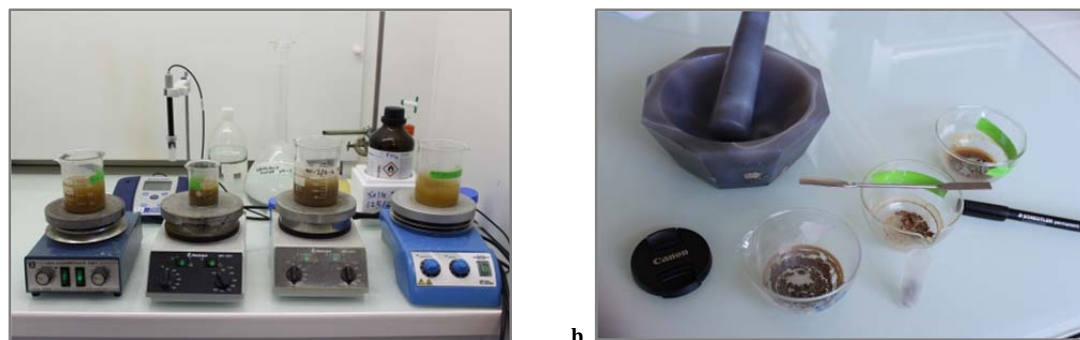


Figure 9-9 Protocole de décarbonatation des échantillons calcaires de la ZNS. a) Acidification et agitation à 70°C, b) échantillons décarbonatés et conditionnés.

La fraction < 5 μm a été obtenue par sédimentation en appliquant la loi de Stokes (eq. 9-1) simplifiée, qui permet d'obtenir la profondeur effective de prélèvement H_t (cm) en fonction de t (min) et de D_k (cm) (eq. 9-19).

$$H_t = 559170 t \cdot D_k^2 \quad \dots(9-19)$$

La suspension a été agitée pendant 24 h pour améliorer la dispersion. Avant l'agitation, un défloculant (Na-hexamétaphosphate) a été ajouté pour disperser les agrégats. Pour prélever la fraction <5 μm , le temps de sédimentation utilisé a été de 20 minutes, ce qui signifie qu'on doit prélever à une profondeur de 2,8 cm sur la suspension à partir de la surface. Le volume prélevé est placé avec une pipette dans une lame en verre et laissé sécher à l'air pendant 24 heures. La solution doit être homogène et recouvrir la totalité de la lame.

Après les premières analyses sur lames orientées séchées à l'air et selon la présence de minéraux gonflables, certains échantillons ont été saturés à l'éthylène glycol et/ou chauffés au four à 500 °C pour déterminer la nature de certaines espèces minérales sensible à ces traitements (Robert et Tessier, 1974).

9.2.1.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'équipement utilisé est un microscope électronique de type Merlin Compact ZEISS, équipé d'une colonne GEMINI I. L'analyse de la géochimie des roches a été faite avec le détecteur d'électrons EDS de type Bruker QUANTAX - XFlash6 - 30mm² de 129 eV de résolution. La texture du matériau a été observée avec un détecteur d'électrons secondaires (SE) de type Everhart-Thornley. La géochimie de la roche a été déterminée par cartographie et repérage sur lame mince des espèces chimiques sous forme d'oxydes, tandis que la texture des roches a été observée sur des échantillons intacts d'environ 1 cm³ (fig. 9-10).

Des échantillons ont été préalablement préparés en forme de lames minces ayant une épaisseur après polissage d'environ 30 µm. Le repérage sur les lames des endroits à observer a été fait à l'aide d'un microscope optique LAICA DMRX couplé à une caméra d'interface digitale SONY modèle XCD-U100 CR avec un objectif HC 0.5 x : 1/2 " Δ 16. Ensuite, les lames ont été métallisées avec du carbone pour améliorer la détection des électrons (fig. 9-10). Les échantillons intacts ont également été métallisés.



Figure 9- 10 Echantillons observés au MEB. Lames minces après repérage sous microscope optique et métallisation. Echantillons intacts en haut de la figure.

Les paramètres pour l'acquisition cartographique et ponctuelle sont les suivants : tension de 15 KeV, courant de 400 pA à 1,7 nA, diaphragme de 120 micron, distance de travail de 10 mm et spot d'analyse de 60 s (ponctuel). Les réglages de

paramètres pour observer la texture à l'aide du détecteur SE sont: tension de 5KeV, distance de travail de 8 mm et diaphragme de 60 micron.

Les données brutes des espèces chimiques sous forme d'oxydes ont été traitées pour calculer la formule chimique des minéraux primaires et secondaires constituant la roche calcaire. Les calculs appliqués (Meunier, 2013) sont les suivants :

$$Nb_{cat}(n^{\circ}O) = \frac{Nb_o \times O_b}{\Sigma Nb_o} \dots(9-20)$$

$$Nb_o = \#O \times Nb_{m-cat} \dots(9-21)$$

$$Nb_{m-cat} = \left(\frac{\% O_x}{M_m} \right) \times 1000 \dots(9-22)$$

où $Nb_{cat}(n^{\circ}O)$ est le nombre des cations ayant comme base de calcul d'oxygènes une quantité d'atomes d'oxygène ($n^{\circ}O$) par demi-formule d'unité déshydratée, O_b (soit 7 O pour les minéraux argileux de type 1:1, 11 O pour le type 2:1 et 14 O pour le type 2:1:1), Nb_o est le nombre d'oxygènes associé à chaque cation, $\#O$ est le nombre d'oxygène associé au monocation constituant l'oxyde correspondant, Nb_{m-cat} est le nombre de monocations par rapport au %Ox mesuré, %Ox est le pourcentage d'oxyde mesuré par le détecteur EDS, M_m masse molaire de l'oxyde correspondant (g/mol). Un exemple de calcul est présenté en annexe (annexe 9-1)

Après le calcul du $Nb_{cat}(n^{\circ}O)$, les mailles (tétraédriques, octaédriques et couches interfoliaires) sont remplies en respectant le balance électrique de charge. Par exemple, pour un minéral de type 2 :1, les contributions de charges mesurées sont 15,86 pour la couche tétraédrique (Si, Al), 5,74 pour la couche octaédrique (Al, R^{2+} , R^{3+}) et 0,4 pour les cations interfoliaires (M^+). Pour le même minéral, les charges théoriques sont 16 pour la maille tétraédrique, 6 pour la maille octaédrique et 0 pour la couche interfoliaire. La balance de charge électrique est calculée selon la somme des différences entre la charge théorique et la charge mesurée de chaque maille. Cette somme est égale à zéro en condition d'équilibre, i.e. : $\Sigma(16-15,86)_{tet} + (6-5,74)_{oct} + (0-0,4)_{int} = 0$.

9.2.2. Détermination de la teneur en carbonates

Pour mieux comprendre la nature de particules des matériaux de la ZNS, la méthode du calcimètre a été appliquée selon la norme NF P 94-048 (AFNOR, 1996) pour la détermination du pourcentage de fraction carbonatée contenue dans le sol ou la roche.

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone dégagé sous l'action de l'acide chlorhydrique apporté en excès sur un échantillon préparé pour l'essai. Pour la préparation de l'échantillon, un séchage est fait préalablement. Ensuite, le matériau est broyé dans un mortier, afin d'obtenir une poudre passant en totalité par un tamis d'ouverture de maille inférieure ou égale à 400 μm , puis séché à 105°C jusqu'à ce que la masse ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives, espacées d'une heure. La quantité de matériau utilisé est d'environ 1 g.

L'équation suivante permet de calculer la teneur en carbonates:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{120 \times V_g \times P_{\text{atm}}}{m \times (T_b + 273)} \quad \dots(9-23)$$

où m est la masse de la prise d'essai (g), V_g est le volume de gaz dégagé lors de l'essai sur le matériau (cm^3), T_b est la température de la salle d'essai ($^{\circ}\text{C}$), P_{atm} est la pression atmosphérique (KPa).

Le tableau ci-dessous présente une classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonates.

Tableau 9- 2 Classification selon la norme NF P94-048 (AFNOR, 1996).

Teneur en carbonate (%)	Classification	Exemple
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10-29	Peu calcaire	Marne
30-69	Moyennement calcaire	Marne
70-89	Fortement calcaire	Calcaire marneux
≥ 90	calcaire	Calcaire

9.2.3. Détermination de la teneur en carbone organique (COT)

Le carbone organique total des échantillons de la ZNS a été mesuré avec le pyrolyseur Rock-Eval 6 Turbo. Le logiciel qui contrôle le dispositif est Rocksix.

L'essai consiste à appliquer une première pyrolyse sous atmosphère inerte (300 à 400 °C), suivie par une deuxième pyrolyse oxydative (400 à 650 °C) et à mesurer les composés hydrocarbonés, CO et CO₂ émis. Le paramètre concerné dans cette analyse est le carbone organique total ou COT.

Les échantillons sont préalablement séchés, puis broyés. Un dernier séchage à 105°C est fait pour débarrasser la poudre des molécules d'eau adsorbées. La quantité de matière à analyser est d'environ 100 mg.

9.3. Propriétés hydriques

9.3.1. Mesure de la teneur en eau in situ des échantillons de la ZNS

La teneur en eau des échantillons juste après leur prélèvement sur terrain a été mesurée pour avoir une idée de leur teneur en eau à la capacité au champ, θ_{terr} . Le protocole de mesure s'appuie sur la norme NF P 94-050 (AFNOR, 1995), dont le principe est la détermination de la teneur en eau de l'échantillon par pesée, avant et après séchage dans une étuve. La température de séchage est de 105 ° pour les matériaux insensibles à la chaleur ou à 50 °C pour les matériaux qui contiennent des quantités significatives de gypse, de smectites ou de matière organique. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau qui était contenue dans l'échantillon. La durée totale du séchage peut varier de quelques heures à plusieurs jours.

La teneur en eau (massique) est déterminée par la formule suivante :

$$w = \frac{M_w}{M_d} \quad \dots(9-24)$$

$$M_w = m_2 - m_3 \quad \dots(9-25)$$

$$M_d = m_3 - m_1 \quad \dots(9-26)$$

où M_w est la masse d'eau, M_d la masse de matériau sec, m_2 la masse de la prise d'essai et de son contenant avant le passage à l'étuve, m_1 la masse du contenant et m_3 la masse de la prise d'essai et de son contenant après le passage à l'étuve.

9.3.2. Angle de contact et tension superficielle de l'eau

L'angle de contact et la tension superficielle de l'eau ont été mesurés afin d'estimer le potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA) des différents matériaux de la ZNS. Ces deux mesures ont été réalisées à l'aide du même dispositif. Il s'agit d'un instrument DigiDrop modèle MCAT, qui permet de mesurer l'angle que forme une goutte de liquide sur une surface, afin de caractériser la mouillabilité de cette surface par le liquide utilisé (fig. 9-11). Il est également possible d'obtenir la tension de surface du liquide. Le logiciel utilisé avec l'instrument est Visiodrop. L'équipement se trouve dans une salle blanche pour éviter les perturbations et/ou pollutions des échantillons pendant les mesures. Quelques caractéristiques de l'instrument : une précision de l'angle de contact de $\pm 0,1^\circ$, une reproductibilité de la mesure de $\pm 0,1^\circ$, une gamme d'angles de 0 à 180° et une gamme de tension superficielle mesurable de 0 à 1000 nN/m. La vitesse d'enregistrement maximale est de 50-60 images/s. Le zoom est de $\times 10$ à $\times 20$.

Deux surfaces calcaires représentatives du matériau ont été préparées, ainsi que deux batchs de solution mouillante ($0,01$ M de CaCl_2 et 3 gouttes/L de NaOCl à 10 %) pour calculer la valeur moyenne des paramètres mesurés. La même solution a été utilisée pour mesurer la tension superficielle.

La méthode utilisée pour calculer l'angle de contact est le modèle polynomial d'ajustement de type régression elliptique, qui consiste à trouver la meilleure ellipse, au sens des moindres carrés décrivant un ensemble de points. Le polynôme à ajuster par le logiciel est représenté par la formule quadratique F suivante: $F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$, où a , b , c , d , e , et f sont des coefficients à ajuster. Les variables x et y représentent l'abscisse et l'ordonnée respectivement. L'ajustement de ce polynôme par rapport à la forme de la goutte se fait par minimisation de la somme des carrés des distances algébriques.

Le volume de la goutte créée pour les mesures est d'environ 5 μL . Dix mesures ont été faites pour ensuite calculer une valeur moyenne.

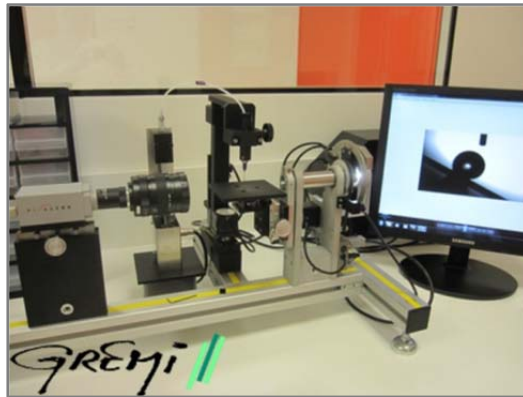


Figure 9- 11 Dispositif DigiDrop (GREMI, Université d'Orléans).

Le calcul du PEA (KPa) a été fait à partir de l'équation 9-27, en substituant D_p par le rayon de pore plus large ($D_{p,max}$) calculé avec la méthode d'injection de mercure (§9.1.5):

$$PEA = \frac{4 \sigma \cos(\alpha)}{1000 D_{p,max}} \dots(9-27)$$

9.3.3. Détermination des courbes de rétention en eau par la méthode de la presse de Richards

Le dispositif est un ensemble de sept enceintes dans lesquelles on injecte de l'azote sous pression. La gamme de pression appliquée va de pF 1 à pF 4,2 (10 cm à 15000 cm). L'essai consiste à reproduire l'effet de succion dans les échantillons placés à l'intérieur de chaque enceinte étanche en les soumettant à une pression d'azote donnée pendant 5 jours et à mesurer la masse d'eau retenue dans l'échantillon à la fin de l'essai.

Des échantillons intacts ont été utilisés. Dans tous les cas, l'échantillon ont été d'abord saturé (fig. 9-12) par capillarité pendant deux semaines dans un cristalliseur sous vide (échantillons cylindriques) et une table de succion (mottes). Les échantillons saturés ont été placés à l'intérieur de chaque cellule (trois répliquats par échantillon pour les mottes et un échantillon unique pour les cylindres).



Figure 9- 12 a) Saturation des échantillons cylindriques sous vide dans un cristallisateur, b) saturation des mottes avec un bac à sable.

Pour avoir un bon contact entre l'échantillon et la céramique ou membrane poreuse (fig. 9-13), une fine couche de pâte de kaolin est ajoutée à la surface de la céramique ou de la membrane.



Figure 9- 13 Mise en place des a) échantillons cylindriques et b) mottes dans la presse de Richards avant la fermeture de l'enceinte.

Il faut aussi que la céramique ou la membrane soit complètement saturée préalablement. Ensuite, les échantillons sont placés en contact avec la pâte de kaolin. Il faut veiller à avoir une bonne étanchéité au moment de la fermeture de chaque enceinte et de s'assurer du bon fonctionnement de la voie du drainage. Après 5 jours, les échantillons sont pesés pour mesurer l'état hydrique à la valeur de succion correspondante. Il faut bien enlever les traces de kaolin pour ne pas fausser les mesures. Finalement, les échantillons sont séchés à 105°C pendant 24 h pour mesurer la masse de l'échantillon sec. La valeur de teneur en eau volumique est calculée selon l'équation suivante :

$$\theta_{pF} = \left(\frac{M_{pF} - M_d}{M_d} \right) \times \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad \dots(9-28)$$

où M_{pF} est la masse de l'échantillon à la fin de l'essai pour une succion à pF donné (g), M_d est la masse de l'échantillon après le séchage à 105°C (g), ρ_b est la masse volumique de l'échantillon (g/cm³), ρ_w est la masse volumique de l'eau (1 g/cm³).

9.3.4. Détermination des courbes de rétention en eau à haute gamme de succion (pF 3 – pF 6).

Les valeurs de teneur en eau au-delà de pF 3 (succion de 1000 cm) ont été mesurées avec un potentiomètre DECAGON modèle WP4C (fig. 9-14-a). Le dispositif permet de mesurer des valeurs de succion sur une gamme entre pF 3,5 (3000 cm) et pF 6,5 (3.10⁶ cm).

Le principe consiste à mesurer l'humidité relative à proximité de la surface du matériau par mesure de la température du point de rosée dans un état d'équilibre entre l'eau et sa vapeur à l'intérieur du dispositif.

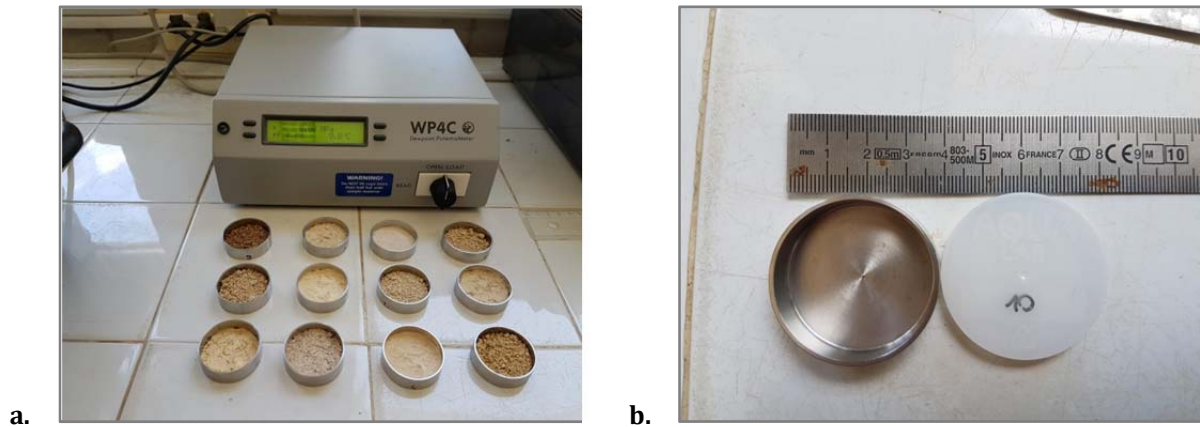


Figure 9- 14 a) Potentiomètre WP4C, b) coupelle en inox adaptée au dispositif.

L'équation suivante (équation de Kelvin) permet de calculer le potentiel matriciel dans le milieu non saturé :

$$h = \frac{RT}{M_m g} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \dots(9-29)$$

où (P/P_0) est l'humidité relative de l'échantillon en équilibre, M_m est la masse molaire du liquide (Kg.mol^{-1}), R est la constante universelle des gaz parfaits ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$), T est la température (K) et g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

Les spécifications techniques de l'appareil sont présentées dans le tableau 9-3 ci-dessous :

Tableau 9- 3 Spécifications techniques du potentiomètre (Meter Environment, 2019).

Gamme de succion	0 – 300 MPa
Précision de la mesure	$\pm 0,05$ MPa de 0 – 5 MPa, 1% de 5 à 300 MPa
Contrôle de température	15 – 40 °C (± 0.02 °C)

Le protocole de mesure consiste premièrement à préparer les échantillons et à les conditionner. Les échantillons sont d'abord séchés 24 h à 105°C et ensuite tamisés avec un tamis d'ouverture de 2 mm. Ensuite, une quantité de matériau sec est pesée, re-humectée puis laissée sécher à l'air. La teneur en eau de l'échantillon séché à l'air (θ_{air}) est obtenue par pesage. Elle est considérée comme celle correspondant à pF 6. Cette valeur permet de faire un calcul approximatif de la teneur en eau à pF 4,2 (θ_{15}) avec l'équation suivante :

$$\theta_{15} = -3,776 \theta_{\text{air}}^2 + 4,036 \theta_{\text{air}} + 0,009 \quad \dots(9-30)$$

A partir de cette valeur de teneur en eau, on peut calculer la quantité d'eau à ajouter à chaque échantillon sec pour obtenir une valeur de θ supérieure à celle correspondant à pF 4,2 mais inférieure à celle correspondant à pF 3 (1000 cm). La teneur en eau à pF 3 a été estimée à partir des données obtenues à l'aide du système triaxial.

Après d'avoir ajouté la quantité d'eau calculée correspondant à une valeur de pF légèrement supérieure à 3, les échantillons sont séchés à l'air et le poids est régulièrement surveillé pour avoir plusieurs mesures entre pF 3 et pF 6. Après chaque mesure, l'échantillon continue sa désaturation jusqu'à la dernière mesure, selon les besoins. Une fois les différentes mesures réalisées, les échantillons ont été séchés à l'étuve (105°C durant 24 h) dans les coupelles en acier pour obtenir la teneur en eau exacte au moment du passage sur le WP4C.

CHAPITRE 10: ECHANTILLONAGE DE LA ZNS

10.1. Travaux de terrain et carottages

La ZNS de l'aquifère de Beauce est un milieu difficile à étudier vu l'hétérogénéité qu'elle présente tout au long de son extension. C'est un système hydrogéologique qui possède une hétérogénéité verticale et latérale. L'étude *in situ* de ce milieu représente un défi, en plus des conditions expérimentales à respecter, telles que le maintien de la teneur en eau des échantillons. Grâce aux techniques de forages utilisées, il est possible de prélever verticalement un volume important d'échantillons que l'on peut étudier au laboratoire en conditions contrôlées pour caractériser les propriétés des matériaux de la ZNS.

10.1.1. Localisation du site d'étude

Préalablement aux travaux de forages sur le site d'étude, les coordonnées cartographiques de 4 forages (dont 3 carottés et 1 destructif) ont été établies et enregistrées dans le système Lambert 93 (tableau 10-1).

Tableau 10- 1 Coordonnées géographiques des forages réalisés à Villamblain lieu-dit « les Hôtels » (Source: Géocentre-Axis Conseils, mars 2017).

N° sondage	Lambert 93		Altitude IGN69 (normal)	Date du levé
	X	Y	Z	
SC1	594300.618	6769598.859	130.369	23/03/2017
SC2	594291.316	6769596.211	130.430	23/03/2017
SC3	594300.967	6769591.180	130.294	23/03/2017
SP	594298.607	6769595.674	130.366	23/03/2017

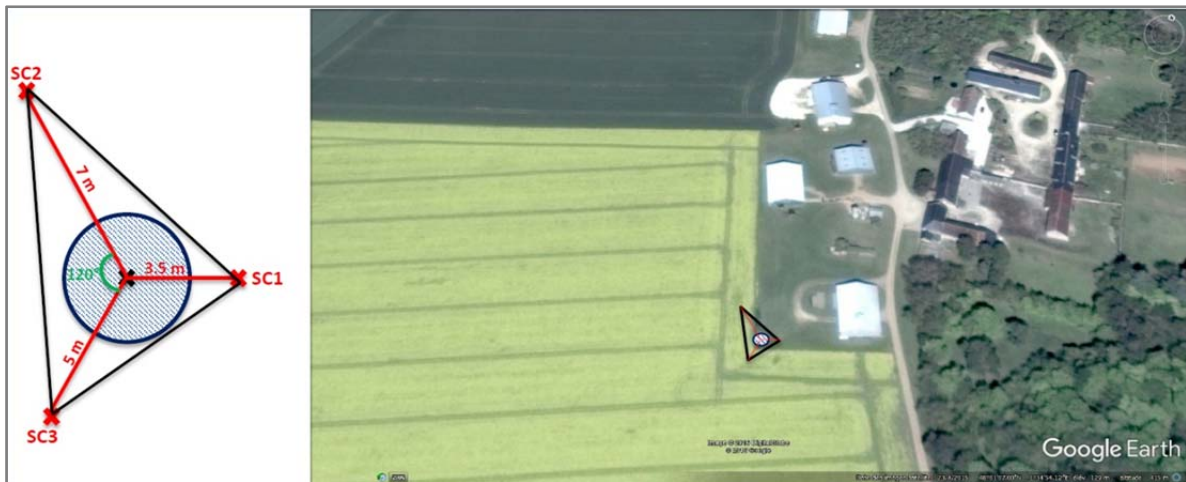


Figure 10- 1 Vue aérienne du lieu-dit « les Hôtels » et localisation des quatre forages.

Chaque sondage carotté a été identifié avec l'acronyme SC, sauf le quatrième puits, localisé à l'intérieur du triangle, qui a été identifié comme SP, car il a été consacré à l'essai pressiométrique (fig. 10-1). La zone circulaire bleue correspond au futur puits qui sera creusé pour l'observation et l'étude de la ZNS *in situ* (projet O-ZNS).

SC1 a été fait sur la partie non cultivée de la parcelle tandis que les autres deux sondages (SC2 et SC3) ont été forés sur la surface cultivée.

10.1.2. Carottage de la ZNS

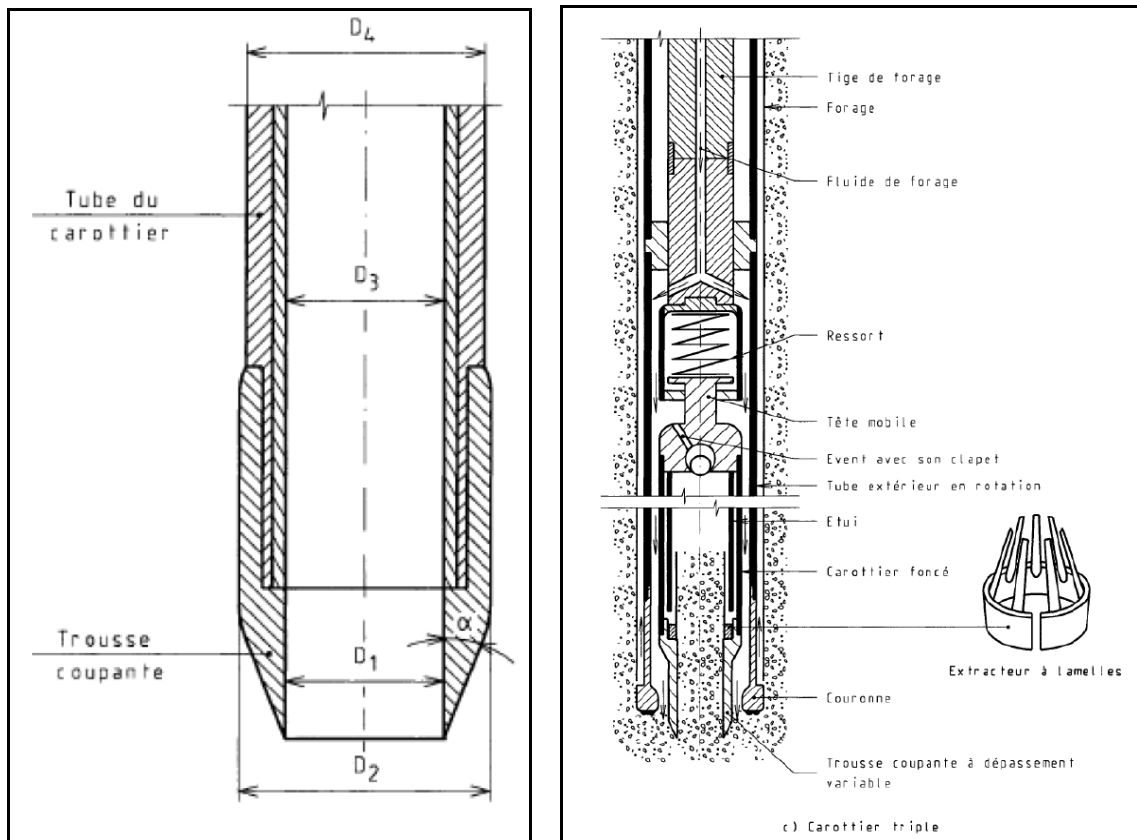
Les sondages carottés ont pour but de dresser la coupe lithologique de la ZNS et de prélever des échantillons intacts dans les différentes formations identifiées. Après les implantations des sondages par un géomètre, la sondeuse a été positionnée pour la réalisation des sondages. Les travaux ont été réalisés à l'aide d'une machine foreuse d'une puissance de 75 chevaux et d'une capacité de traction de 13 tonnes, fournie par la société GEOCENTRE (fig. 10-2). Le diamètre externe du carottier choisi est de 116.3 mm, tandis que le diamètre interne de l'outil est de 93 mm (diamètre de la carotte). L'outil de prélèvement est de type *carottier triple* (fig. 10-3-b). Les premiers mètres de la ZNS ont été prélevés par la technique de *percussion* à l'aide d'un autre carottier de type poinçonneur (fig. 10-3-a) de 80 mm de diamètre interne pour creuser à sec. Le tableau 10-2 présente la liste des outils utilisés pendant les travaux de creusement et prélèvement.



Figure 10- 2 Machine foreuse pour la réalisation des puits sur le site d'étude à Villamblain.

Tableau 10- 2 Liste des outils utilisés lors du programme de forage sur le site d'étude à Villamblain. ϕ : diamètre de l'outil.

Sondage	N°	Prof. (m)	Type de carottier	ϕ -in. (mm)	ϕ -ext. (mm)	Gaine	Fluide
SC1 - SC2- SC3	1	0 ~ 2	Poinçonneur	80	116,3	Opaque	Non
	2	2 ~ 20	Triple	93	116,3	Transparente	Oui (eau)
SP	1	0 - 20	Couronne tricône	-	64	-	Oui (eau)



a. Carottier de type poinçonneur b. Carottier triple
Figure 10- 3 Schémas des carottiers utilisés pour les sondages carottés SC (Stenmans et al., 2009)

L'idée était d'éviter la perte de matériau par l'action du lavage des sols. Le taux de récupération a été de presque 100 % dans les premières mètres (fig. 10-4).



Figure 10- 4 Taux de récupération élevé (environ 100 %). SC2. Carottage à sec avec poinçonneur.

Après avoir échantillonné les faciès meubles, l'outil de perçage a été remplacé par l'outil de forage pour travailler à l'eau et forer en rotation avec une couronne diamantée. Après le changement d'outil, les échantillons intacts ont été prélevés avec une gaine transparente en PVC, par passes de 1 mètre, selon la norme XP P94-202 (AFNOR, 1995 ; fig. 10-5). Les échantillons amenés en surface ont été répertoriés (référence chantier, nom de l'entreprise, numéro de sondage, date du prélèvement) au marqueur indélébile et envoyés au laboratoire d'essais d'ANTEA Group. Chacun des trois sondages carottés fait environ 20 m de profondeur. Le niveau d'eau libre de la nappe a été trouvé à 18,3 m de profondeur moyenne après plusieurs relevés.

Un essai pressiométrique a été effectué uniquement dans le sondage SP. Le creusement s'est fait à l'aide d'une couronne tricône de 64 mm. L'essai consiste à descendre à une profondeur donnée, une sonde cylindrique gonflable dans un forage calibré. Les déformations du matériau au contact de la sonde sont mesurées en fonction de la pression radiale appliquée (ARVOR Géotechnique, 2010). L'essai permet également d'enregistrer tous les paramètres de forage, ce qui est impossible à faire pendant le carottage. Les paramètres mesurés sont la vitesse d'avancement, la pression de poussée, la pression d'injection de fluide et le couple de rotation de l'outil (annexe 10-1).



Figure 10- 5 Gaines transparentes pour le carottage à l'eau avec le carottier triple.

Après d'avoir finalisé l'essai pressiométrique, un réalésage de 64 mm à 116 mm a été réalisé afin de pouvoir introduire ultérieurement des outils de diagraphie.

10.2. Manipulation et préservation des échantillons

Toutes les carottes ont été protégées par un étui ou gaine en PVC mis en place lors du carottage. En surface, la carotte protégée est sortie du carottier et ensuite protégée à chaque extrémité avec un bouchon PVC et du scotch pour assurer l'étanchéité. Pour le transport, les échantillons ont été mis en sécurité dans une caisse métallique pour éviter les chocs et protéger l'intégrité des matériaux transportés. Dans un premier temps, toutes les carottes ont été stockées à l'abri de la lumière et des variations de température.

L'identification et la description des matériaux de la ZNS (fig. 10-6) a été faite selon la norme XP P 94-011 (AFNOR, 1999). Les caractéristiques observées pendant la description sont : la classe granulométrique dominante, l'aspect de l'ensemble de l'échantillon (friabilité, couleur), la consistance et la présence de carbonates et/ou de MO. La description lithologique a permis de produire une coupe pour chaque sondage. Chaque carotte a été identifiée avec l'acronyme EI (élément intact)-# suivi par un nombre.



Figure 10- 6 Ouverture de carottes pour la description lithologique.

Après cette description qualitative, les échantillons consacrés à l'étude des propriétés de transport ont été prélevés et stockés (fig. 10-7). Le prélèvement sous gaine a été fait avec une scie diamantée. Les échantillons meubles ont été coupés à sec et les échantillons de roche dure à l'eau. La partie choisie de la carotte de 1 m (sous gaine) est découpée sur une longueur de 10 à 15 cm pour faciliter la manipulation (fig. 10-7).

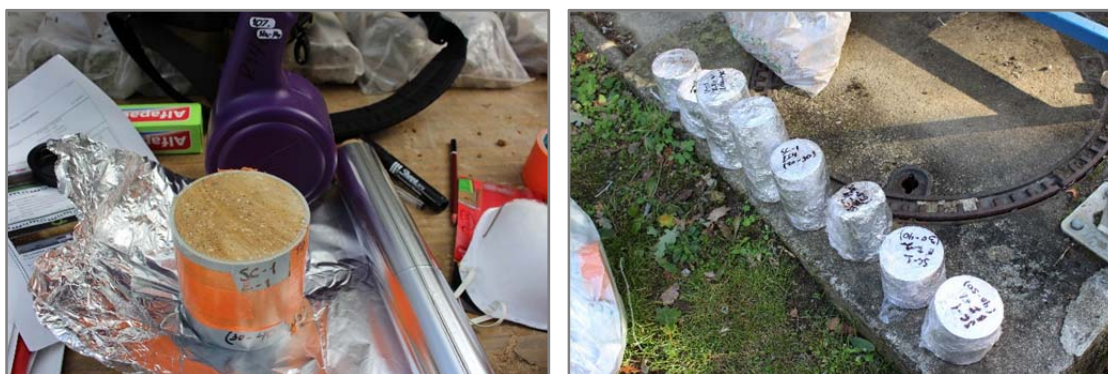


Figure 10- 7 Choix des échantillons pour la mesure des propriétés hydriques et la caractérisation des matériaux.

Les échantillons sont laissés sous gaine pour améliorer leur préservation (fig. 10-7). Une solution aqueuse de 0.01 M de CaCl_2 et 10 % de NaOCl a été utilisée pour arroser les surfaces exposées de la carotte à l'aide d'un pulvérisateur. Le NaOCl évite le développement des microorganismes et le CaCl_2 évite le gonflement des minéraux argileux. Ensuite l'échantillon est enveloppé avec un film aluminium puis plusieurs

couches de film étirable pour préserver l'état d'humidité du matériau. Chaque échantillon prélevé a été répertorié selon le SC dont il est issu et selon sa profondeur. Pour aider à la préservation, tous les échantillons sont stockés dans une chambre à 3 ° C.

En plus du recarottage pour les essais de conductivité hydraulique, de nombreux échantillonnages ont été faits tout au long de chaque carotte pour faire des analyses des propriétés physiques et chimiques du matériau (fig. 10-8).



Figure 10- 8 Sous-échantillonnage : a) d'un faciès de calcaire gravier, b) d'un faciès de roche calcaire altérée, c) d'un profil de fracture d'une roche saine.

10.3. Préparation des échantillons pour la mesure des propriétés hydriques.

La procédure comporte plusieurs étapes. A partir de la carotte de 93 mm de diamètre, une éprouvette est prélevée avec un diamètre de 70 mm et une hauteur de 30 à 60 mm. Le protocole diffère pour les matériaux meubles (sols et roches meubles) et pour les roches calcaires dures.

10.3.1. Sols et roches meubles de la ZNS

La gaine est enlevée, et le recarottage réalisé avec une trousse coupante de 70 mm de diamètre et 30 mm d'hauteur (fig. 10-9). Ces dimensions sont adaptées à la cellule triaxiale et à ses accessoires respectifs.

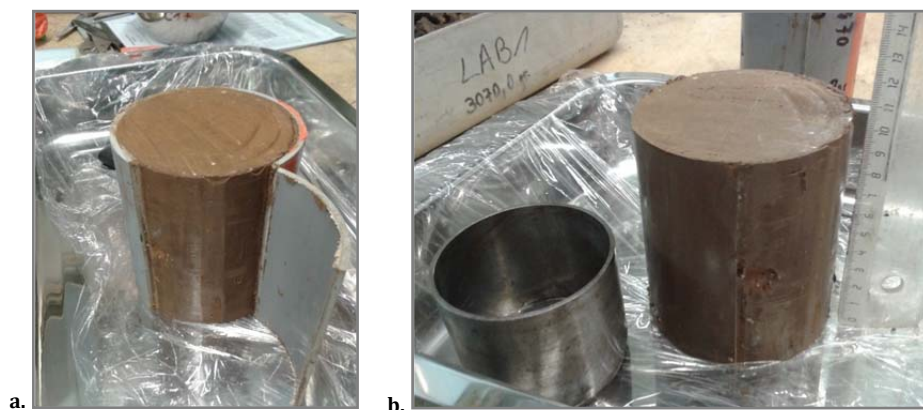


Figure 10- 9 a) Carotte sous gaine de 96 mm de diamètre et 100 cm de hauteur, b) Carotte sans gaine prête pour le prélèvement de l'éprouvette avec la trousse coupante en 70 mm.

L'échantillon est prélevé à l'aide de la trousse coupante et d'une presse pneumatique qui permet d'enfoncer de façon homogène l'anneau métallique (fig. 10-10-a). Le matériau au-delà du périmètre de la trousse coupante est découpé à l'aide d'un couteau pour réduire l'effet de tassement et la déformation de l'échantillon. Finalement, on relève le diamètre et la hauteur moyenne de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse numérique (fig. 10-10-b) ainsi que sa masse à sa teneur en eau naturelle.

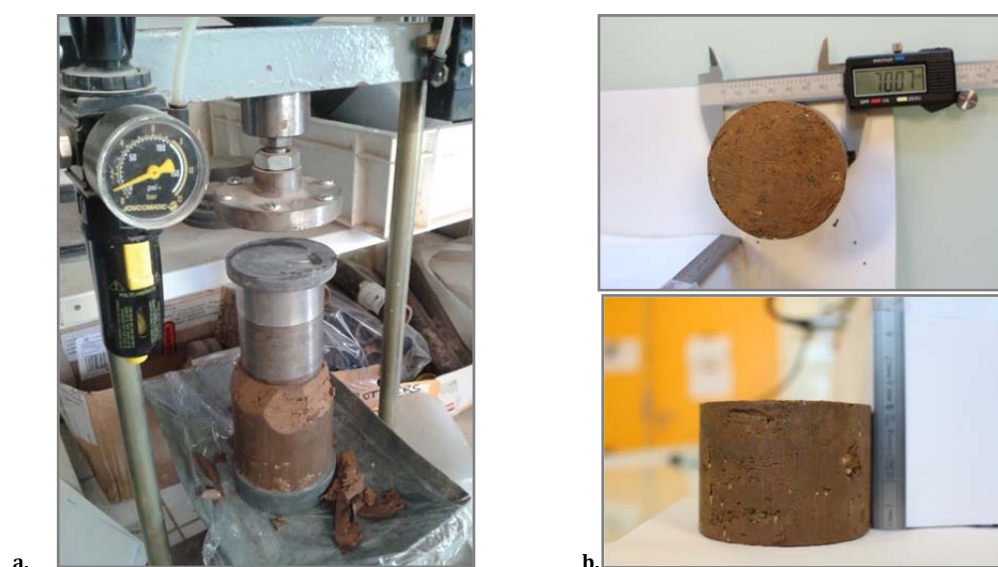


Figure 10- 10 a) Recarottage avec une trousse coupante à l'aide d'une presse pneumatique, b) Mesures de l'éprouvette.

10.3.2. Roches calcaires dures

Le protocole de préparation des échantillons de roche dure varie par rapport aux échantillons meubles. Vu la nature du matériau, des outils plus adaptés et robustes ont été utilisés. Le recarottage de roche est fait avec une carotteuse équipée d'une couronne diamantée de 70 mm de diamètre interne (fig. 10-11-a). La vitesse d'avancement de l'outil a été un paramètre surveillé pour préserver l'intégrité de l'échantillon (environ 5 mm/min).

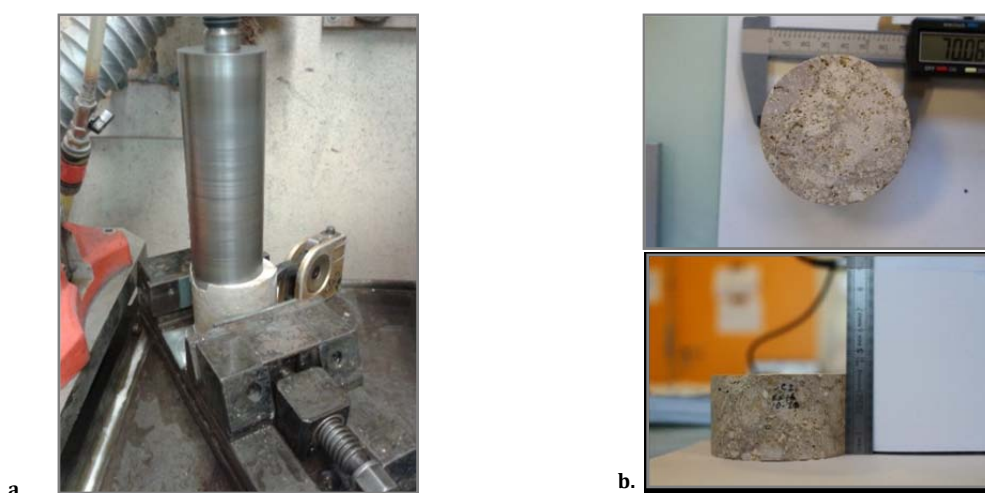


Figure 10- 11 a) Recarottage avec une couronne diamantée (atelier ANTEA Group). b) Mesure de dimensions de l'éprouvette après prélèvement

Ensuite, l'échantillon est coupé à l'aide de la scie diamantée, pour réduire la hauteur de l'échantillon. Celle-ci a une valeur entre 3 et 6 cm, en fonction de la quantité de matériau disponible. Une éprouvette de 3 cm de hauteur est conseillée pour réduire la durée de l'essai. Cependant, il faut que l'échantillon choisi soit homogène. Après avoir coupé l'échantillon à la bonne hauteur, les deux faces circulaires doivent être rectifiées à l'aide d'un lapidaire à disque diamanté (fig. 10-12). Cette procédure permet d'obtenir des faces planes bien parallèles entre elles et perpendiculaires à la hauteur de l'échantillon. Cela permet un meilleur contact entre la céramique et la base de l'échantillon. Finalement, on relève le diamètre et la hauteur moyenne de l'éprouvette.



Figure 10- 12 Rectification d'un échantillon de roche à l'aide d'un lapidaire et d'un pied à coulisse.

PARTIE III:

RESULTATS DES ANALYSES ET DES MESURES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 11: DESCRIPTION DES FACIES DE LA ZONE NON SATURÉE A VILLAMBLAIN

Introduction

Une description détaillée de l'ensemble de la ZNS a été faite à partir des carottages réalisés sur le terrain. L'objectif principal de cette description est la connaissance en détail de toute la ZNS et l'identification des endroits les plus pertinents pour l'échantillonnage et la réalisation des caractérisations physiques et chimiques au laboratoire.

La ZNS a été décrite dans sa totalité depuis la surface du sol jusqu'à 20 mètres de profondeur pour chacun des trois sondages carottés (SC1, SC2 et SC3). Sur toutes les photographies des carottes présentées, l'échelle est en cm. La totalité des photos des carottes sont présentées dans l'annexe 11-1.

La ZNS est caractérisée par une variabilité verticale et horizontale, laquelle peut être constatée par les différents faciès trouvés. Quatre familles lithologiques ont été établies après la description qualitative. Ce sont : 1) le sol, 2) une marne calcaire, 3) un sable marneux, 4) un calcaire micritique cohérent, généralement fracturé. Ce faciès calcaire a été subdivisé en trois types, selon son état et le type d'altération auquel il a été soumis : sain, altéré et avec des vacuoles de dissolution. Tous ces faciès ont une origine calcaire, qui est liée à l'histoire de la sédimentation du Bassin Parisien (Trautmann, 1974).

11.1. Le sol

La profondeur du sol agricole varie entre 20 et 60 cm entre les trois carottes observées (fig. 11-1 et 11-2). Le sol possède une texture typique d'un sol limono-argileux. On constate la présence d'éléments anguleux millimétriques noirâtres, correspondant à des résidus de matière organique issus des différentes cultures agricoles. Egalement, il peut y avoir des cailloutis centimétriques et millimétriques de calcaire blanchâtre en train d'être altérés par l'action de l'eau et des conditions de surface. La présence de ces particules est plus importante dans la zone non labourée (SC1, fig. 11-3).



Figure 11- 1 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 2 (SC2) prélevé entre la surface et 1,25 m de profondeur.



Figure 11- 2 Carotte 2 (EI-2) du sondage carotté 3 (SC3) prélevé entre 1 et 2 m de profondeur.

Après l'horizon de sol remanié par le labour, on trouve un horizon dans lequel la structure du sol est restée plutôt intacte. Cette couche présente une teneur en eau plus importante et une plasticité légèrement plus élevée que celle du sol labouré. On observe également la présence de graviers millimétriques de calcaire (effervescence à l'HCl). Sur la figure 11-1 (SC2), ce faciès se trouve entre 0,2 et 0,9 m de profondeur. Dans le SC-3, la couche de sol brun intacte est développée entre 0,3 et 1,8 m (fig. 11-2).



Figure 11- 3 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 1 (SC1) prélevé entre la surface et 0,4 m de profondeur.

Le sondage carotté 1 (SC1) a été prélevé dans une partie non cultivée ce qui explique l'absence d'horizon remanié en surface (fig. 11-3). Il est légèrement plus compact et avec une teneur en matière organique plus importante, comme le montre la couleur observée.

11.2. Marne calcaire

Ce faciès présente des caractéristiques très différentes de celles des horizons limono-argileux plastiques du sol sus-jacent. La couleur beige de ce faciès est la première caractéristique évidente par rapport aux horizons précédents. Son épaisseur peut varier entre 3 et 5 mètres avec des intercalations sableuses. La texture de ce faciès est plutôt limoneuse (limons fins à grossiers) avec moins d'argile que dans l'horizon de sol non travaillé. Ce groupe lithologique a été observé avec deux textures différentes. Une marne dite « sableuse », étant donné sa granulométrie relativement grossière. Ce premier faciès marneux se trouve juste après la couche de sol intacte. Une deuxième couche marneuse est observée plus en profondeur, juste après les intercalations de sable et au-dessus de la roche calcaire. Sa texture est limoneuse fine et elle présente une certaine plasticité et très peu de friabilité.

La marne de texture grossière est observée à partir de 95 cm de profondeur dans le sondage SC1 et SC2 (fig. 11-1 et 11-4). Pour le sondage SC3, on observe le changement de faciès vers 1,8 m de profondeur (figure 11-5).



Figure 11- 4 Carotte 1 (EI-1) du sondage carotté 1 (SC1) prélevé entre 0,8 et 1,5 m de profondeur.



Figure 11- 5 Carotte 2 (EI-2) du sondage carotté 3 (SC3) prélevé entre 1 et 2 m de profondeur.



Figure 11- 6 Carotte 2 (EI-2) du sondage carotté 2 (SC2) prélevé entre 1,5 m et surface et 2,75 m de profondeur.

Cette couche de marne devient plus friable avec la profondeur quand on la trouve dans un état peu humide. Dans le sondage SC2 par exemple, on constate la présence d'intervalles localement indurés entre 2 et 2,5 m de profondeur avec des éléments millimétriques à centimétriques (fig. 11-6).

On peut observer dans la figure 11-7 le faciès marneux de texture fine à une profondeur de 6 m dans le sondage carotté 2, jusqu'à la transition lithologique avec la roche dure vers 6,6 m de profondeur. Dans le sondage carotté 3, cette lithologie est observée à la même profondeur que dans SC2. Ce faciès n'est pas observé dans le SC1, probablement à cause d'une récupération pauvre de la carotte pendant le prélèvement (annexe 11.1).



Figure 11- 7 a) Couche de marne avec texture limoneuse fine (rectangle rouge) observé dans SC 2 entre 6 et 6,6 m de profondeur, b) couche de marne avec texture limoneuse fine (rectangle rouge) observé dans le SC 3 entre 6 et 6,6 m de profondeur.

11.3. Sable marneux

Les intercalations de sable sont localisées à partir d'une profondeur de 3,6 m. Elles forment parfois des couches peu épaisses de sable, de sable marneux ou de sable grossier avec des particules de la taille des graviers (entre 2 et 10 mm). La présence de

cette lithologie sableuse a été constatée dans les trois sondages carottés (fig. 11-8, 9 et 10). Néanmoins, la longueur de l'intervalle observé varie pour chaque sondage ainsi que la texture.



Figure 11- 8 Couche sablo-marneuse (rectangle rouge) du SC1 prélevé entre 4,7 m et 5,5 m de profondeur



Figure 11- 9 Couche sablo-marneuse (rectangle rouge) du SC2 prélevé entre 3,6 m et 4,6 m de profondeur.



Figure 11- 10 Couche sableuse (rectangle rouge) du SC3 prélevé entre 4 m et 4,7 m de profondeur.

Dans les sondages SC1 et SC2, l'épaisseur observée est de 30 et 55 cm respectivement (fig. 11-8 et 11-9). La texture observée pour cet intervalle dans SC1 et SC2 est sablo-marneuse, tandis que la texture observée dans SC3 est très peu marneuse, avec des particules de sable grossier (fig. 11-10) et des éléments angulaires de grande taille. L'intervalle sableux dans SC3 est plus développé, avec une épaisseur de 70 cm.

Dans les figures 11-11, -12 et -13 (SC1, SC2 et SC3, respectivement), on observe des intercalations sableuses plus en profondeur avec des épaisseurs moins développées. Pour le SC1 (fig. 11-11), on trouve une couche sableuse se trouve entre 5,7 et 6,1 m de profondeur. Pour SC2 (fig. 11-12), l'intercalation de sable plus profonde est retrouvée entre 4,6 et 4,85 m de profondeur. Pour SC3, la couche sableuse, plus marneuse que dans les SC1 et 2, se retrouve entre 5 et 5,3 m de profondeur.



Figure 11- 11 Carotte 6 (EI-6) du sondage SC1 prélevé entre 5,7 m et 6,1 m de profondeur.



Figure 11- 12 Carotte 5 (EI-5) du SC2 (4,6 à 5,4 m). Faciès de sable grossier (rectangle rouge).



Figure 11- 13 EI-6 du SC3 prélevé entre 5 m et 5,6 m de profondeur. Sable fin (rectangle gauche) et marne (rectangle droit).

De façon générale, une hétérogénéité verticale importante a été constatée dans les 5-6 premiers mètres de la ZNS.

11.4. Calcaire dur

11.4.1. Roche saine

La roche dure a une texture micritique (grain très fin) et une consolidation très élevée. Sa couleur est souvent beige grisâtre, typique d'une roche carbonatée (fig. 11-14). Vu son état de cristallisation, le calcaire observé a une histoire de sédimentation lacustre de basse énergie, probablement liée à une grande étape de transgression de la mer (Trautmann, 1974).



Figure 11- 14 Roche calcaire saine avec des fractures (12,7-13, 7 m-SC3).

La transition entre la marne et la formation de roche dure est observée à environ 6,6 m de profondeur (SC2) (fig. 11-15-a). Ce faciès s'étend jusqu'à la nappe de l'aquifère (environ 18,3 m).

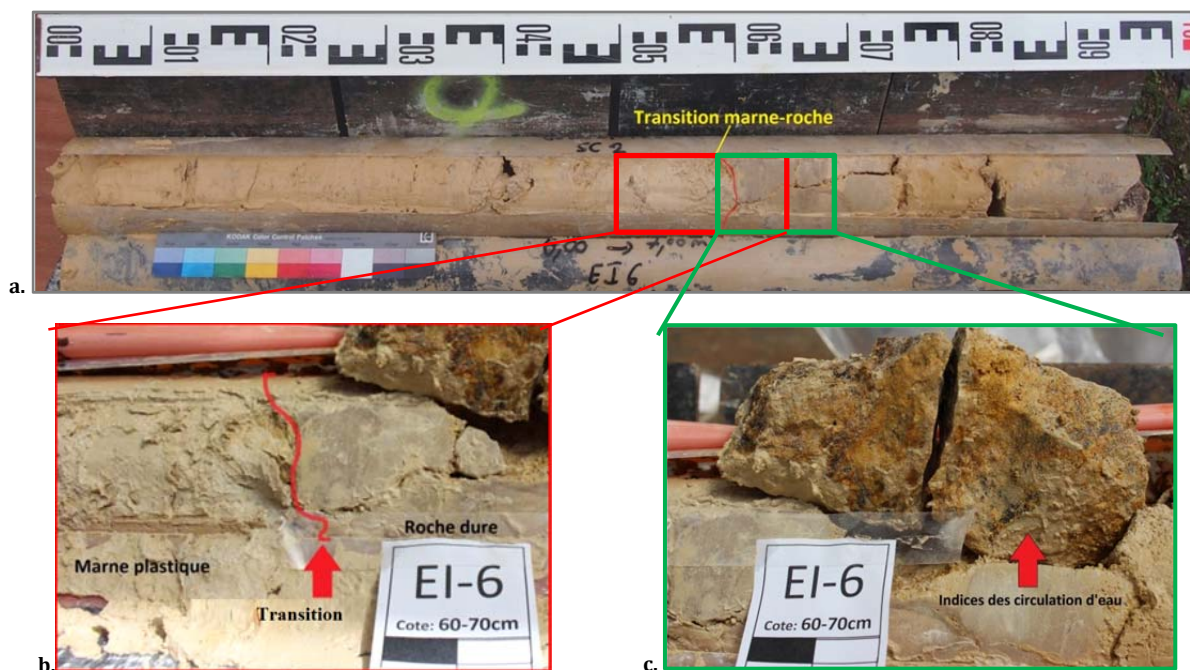


Figure 11- 15 a) EI-6 du SC2 (6 à 7 m), b) transition marne plastique-roche dure imperméable à 6,6 m de profondeur, c) roche fracturée avec précipitation de minéraux secondaires

Après l'ouverture des carottes, on a observé une roche calcaire dure avec différents états physiques : une roche saine sans ou avec des fractures (altération mécanique), une roche désagrégée (altération mécanique) et une roche altérée (altération chimique). Des phénomènes de dissolution sont mis aussi en évidence par la présence de vacuoles de dissolution.

11.4.2. Roche fracturée

La roche dure de la ZNS est caractérisée par la présence des fractures (fig. 11-14, 11-16, 11-17) tout au long de la ZNS. La taille des fractures observées dans la roche varie entre

quelques microns (microfissures) et plusieurs centimètres. Les réseaux de fractures peuvent imposer des écoulements relativement rapides à travers la roche calcaire de la ZNS (si les fractures sont saturées).



Figure 11- 16 Calcaire micritique grisâtre très fracturé. EI-9 du SC3 (8 à 9 m).



Figure 11- 17 EI-11 du SC2 (11 à 12 m). Le rectangle rouge est une zone de macro-fracturation à 11,5 m de profondeur.

Selon les observations, les réseaux de fracturation montrent que celles-ci ont été actives dans l'écoulement de l'eau, étant donné la présence d'oxydes qui ont précipité dans la roche (fig. 11-18). Ce phénomène peut être observé dans la plupart des fractures trouvées dans la roche massive saine.

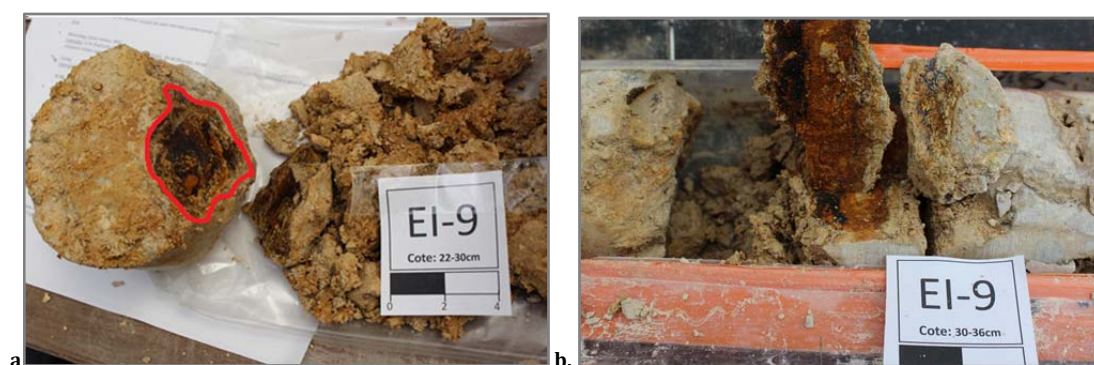


Figure 11- 18 a) Zone d'altération et de fracture avec traces d'oxydes (rouges) entre 9,22 et 9,3 m de profondeur b) zone d'oxydation observé à environ 9,3 m de profondeur (SC2).

La présence de fractures diminue probablement l'incidence de l'altération géochimique sur la matrice calcaire. Par exemple, sur la figure 11-18, on n'observe que la précipitation d'oxydes à travers la fracture et pas d'altération de la matrice de la roche. A

cet endroit, il y a une absence de particules fines probablement due à un processus de lessivage important.

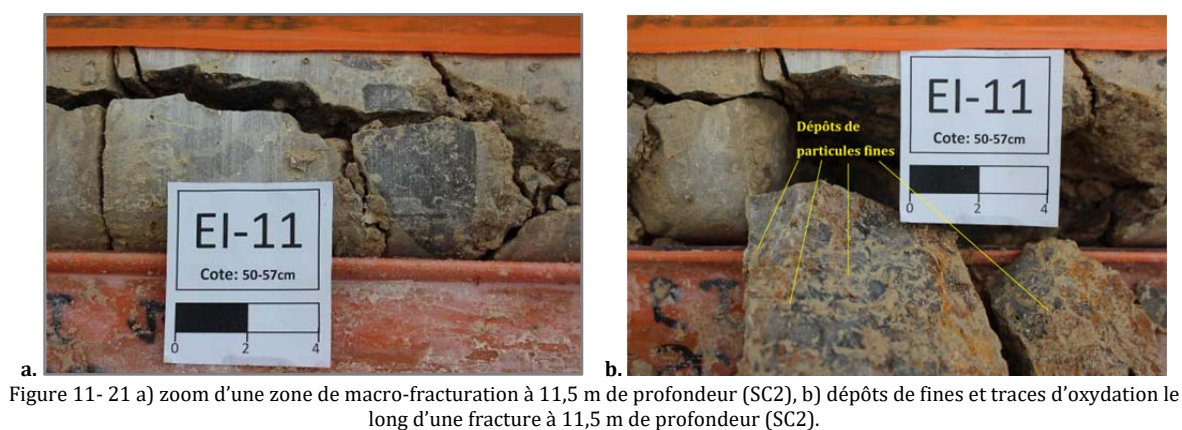
11.4.3. Accumulations dans les fractures

La présence de matériaux meubles dans les macrofractures est observée sur l'ensemble du calcaire dur. Dans certains cas, on a constaté des zones fracturées remplies de grave calcaire, parfois, contenant des matériaux légèrement plastique ayant une taille argileuse (fig. 11-19-b).



Figure 11- 19 a) Calcaire micritique grisâtre très fracturé, EI9-SC2 (9 à 10 m), b) zone d'accumulation et d'altération.

Sur les figures 11-20-b et 11-21-b, on observe des particules de taille limono-argileuse qui se sont déposées dans les endroits fracturés. Sur la figure 11-21-b, l'accumulation dans la fracture est peu abondante et le matériau déposé est probablement lié au transport de sédiments plus superficiels.



11.4.4. Roche fragmentée

Dans certains endroits de la ZNS, on observe une fragmentation de la roche dure. Ces séquences se différencient bien de la roche d'origine. Sur les figures 11-22-b et 11-23-b, par exemple, on voit des transitions de roche vers des faciès graveleux calcaires légèrement marneux, de granulométrie hétérogène, à une profondeur de 13,75 m et d'environ 15 m et 15,5 m dans le SC2. Ces faciès à graviers ont une texture plus argileuse dans les zones situées à proximité de la roche saine. On peut y trouver une accumulation d'eau due à l'absence de porosité de la roche sous-jacente(fig. 11-22-b).



La nature de la roche calcaire de la figure 11-22 entre la cote 82 et 90 cm (13,8 m) est différente de la roche micritique décrite préalablement. On observe des inclusions grises foncées de graviers calcaires de taille centimétrique. Ce faciès peut être lié à une histoire de sédimentation de moyenne à haute énergie de transport. Dans ces conditions, la diagenèse dans ses étapes de compaction-cimentation rend la roche vulnérable à la désintégration, ce qui n'est pas vrai pour les intervalles de roches de granulométrie plus

homogène. Cela pourrait expliquer la déstructuration graduelle de l'intervalle 70-80 cm de l'échantillon EI-13 (figure 11-22).

11.4.5. Roche altérée

L'altération de la roche est observée à plusieurs profondeurs (fig. 11-24, -25 et -26). Elle présente différents états d'altération et de fissuration liés aux d'interactions eau-roche.



Figure 11- 24 Différents états d'altération dans la roche calcaire micritique. EI-4 du SC1 (3,2 à 4,6 m). Roche dure (rectangle rouge)



Figure 11- 25 Différents états d'altération dans la roche calcaire micritique. EI-5 du SC2 (4,6 à 5,4 m).



Figure 11- 26 EI-7 du SC3 (6 à 6,8 m). Roche dure (rectangle rouge)

Les premières séquences de roche observées sur l'ensemble stratigraphique ont subi une altération importante due à sa faible profondeur et au contact avec les eaux provenant de la surface. Dans le SC2, à environ 5 m de profondeur (rectangle rouge à gauche, fig. 11-25), on observe une déstructuration de la roche qui a été plus ou moins altérée. A ce niveau, on trouve une transition entre les sédiments meubles de la ZNS et la roche calcaire dure (rectangle rouge de la fig. 11-24, rectangle rouge à gauche dans la fig. 11-25, rectangle rouge de la fig. 11-26).

De plus près, sur la figure 11-27 ci-dessous, on observe plusieurs zones d'altération de la roche. Deux transformations ont eu lieu : la première est liée aux effets mécaniques qui ont produit une désintégration graduelle de l'ensemble rocheux (morceaux de roche fracturée et concassée, rectangle à droite sur la fig. 11-27). La deuxième altération est due aux phénomènes géochimiques dans lesquels l'eau interagit avec la matière calcaire solide (rectangle rouge à gauche dans la fig. 11-27).

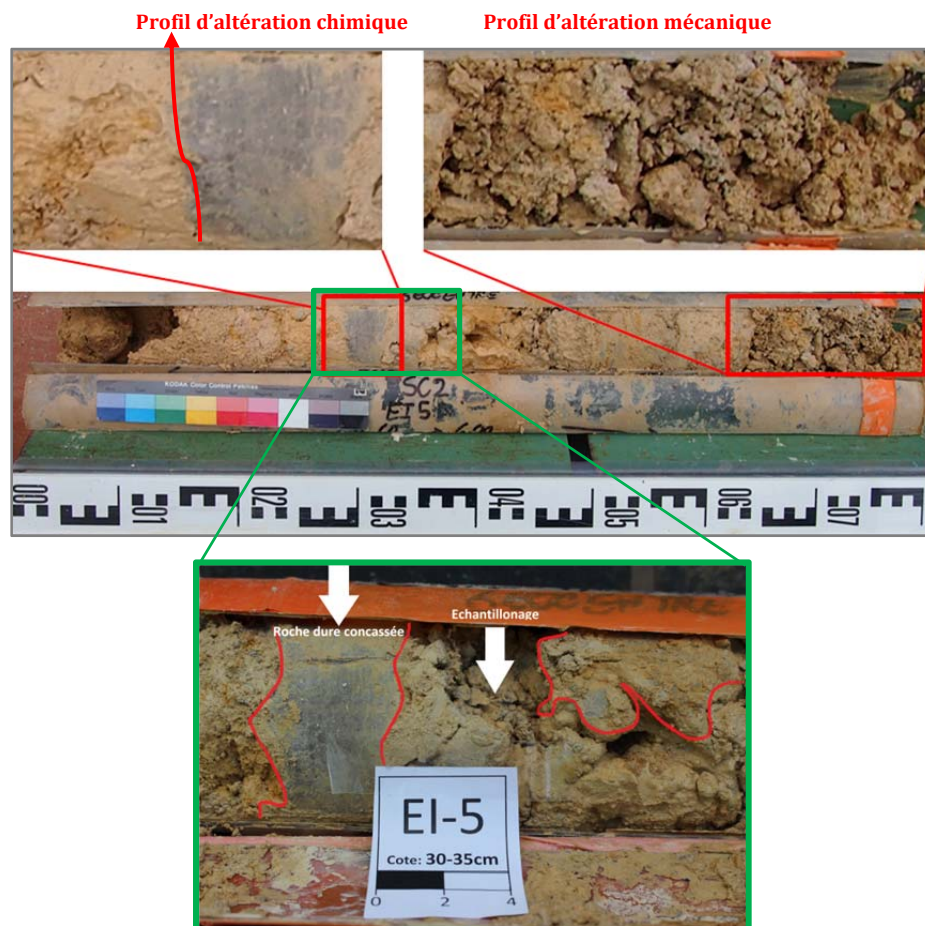


Figure 11- 27 Altérations observées sur la roche calcaire dure. EI-5 du SC2 (4,6 à 5,4 m).

Les effets mécaniques fragmentent la roche et augmente la surface spécifique de la phase solide. Cette action accélère l'altération géochimique de la roche mère. Sur le profil d'altération de la figure 11-27 (rectangle vert à gauche), on observe une alternance de calcaire micritique et de grave calcaire à matrice marno-sableuse, liée à la combinaison des effets mécaniques et géochimiques.

11.4.6. Transformation de la roche dans la zone de battement de la nappe

Les quatre derniers mètres de la ZNS (entre 16 et 20 m), proches de la nappe, sont caractérisés par une roche calcaire plutôt concassée et lavée par la remontée de l'eau.

Dans la figure 11-28, on voit une chronique piézométrique à Villamblain obtenue à partir des valeurs enregistrées dans la commune de Poiseaux à 4 Km au sud du site, recalée (de la différence d'altitude) sur les quelques mesures réalisées à Villamblain.

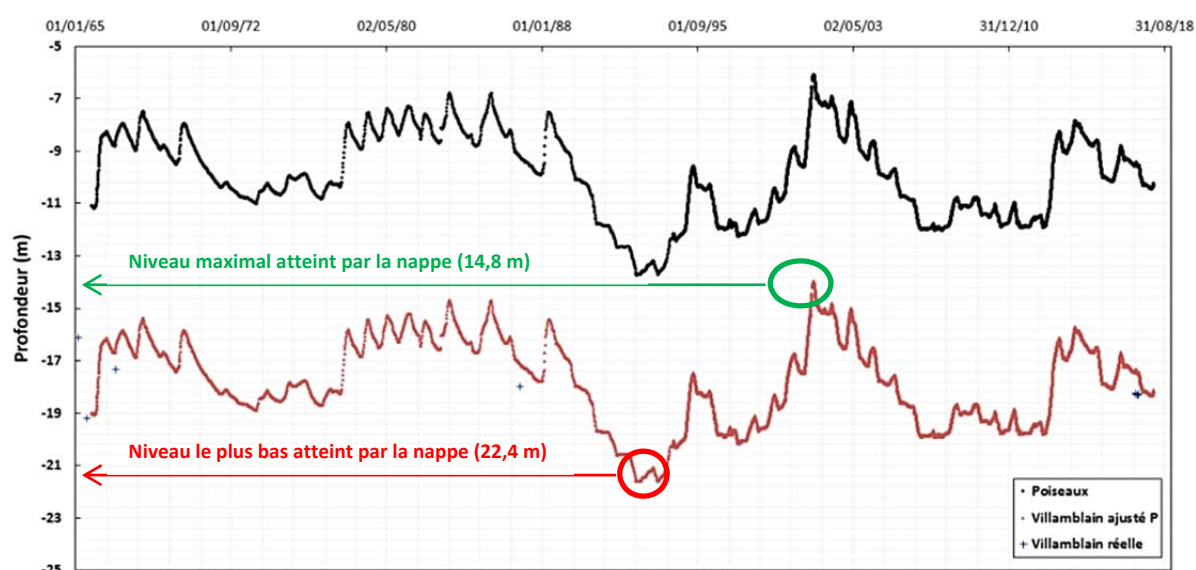


Figure 11- 28 Chronique piézométrique de Villamblain ajustée à partir de la chronique mesurée à Poiseaux aux données disponibles sur le site d'étude.

On peut voir que la profondeur minimum de la nappe en avril 2005 est d'environ 14,8 m et que son niveau maximum a été 22,4 m en septembre 1992.

On observe parfois des particules de grande taille avec une géométrie angulaire (19,1-19,55 m ; fig. 11-29). C'est la zone alimentée par l'eau de la zone saturée remontant lors des variations saisonnières de la nappe.



Figure 11- 29 EI-19 du SC2 (19 à 19,75 m). Calcaire beige grisâtre pseudo-brechique concassé.

Le niveau piézométrique ou surface libre de l'aquifère a été repéré à environ 18,3 m de profondeur en mars 2017. La roche calcaire présente des zones de forte dissolution constatées par la présence de vacuoles millimétriques à centimétriques tout au long des carottes prélevées (fig. 11-30) entre 18 et 20 mètres de profondeur. Le calcaire au niveau de la nappe est déstructuré (fig.11-30 et 11-31) à cause de l'interaction eau-roche.

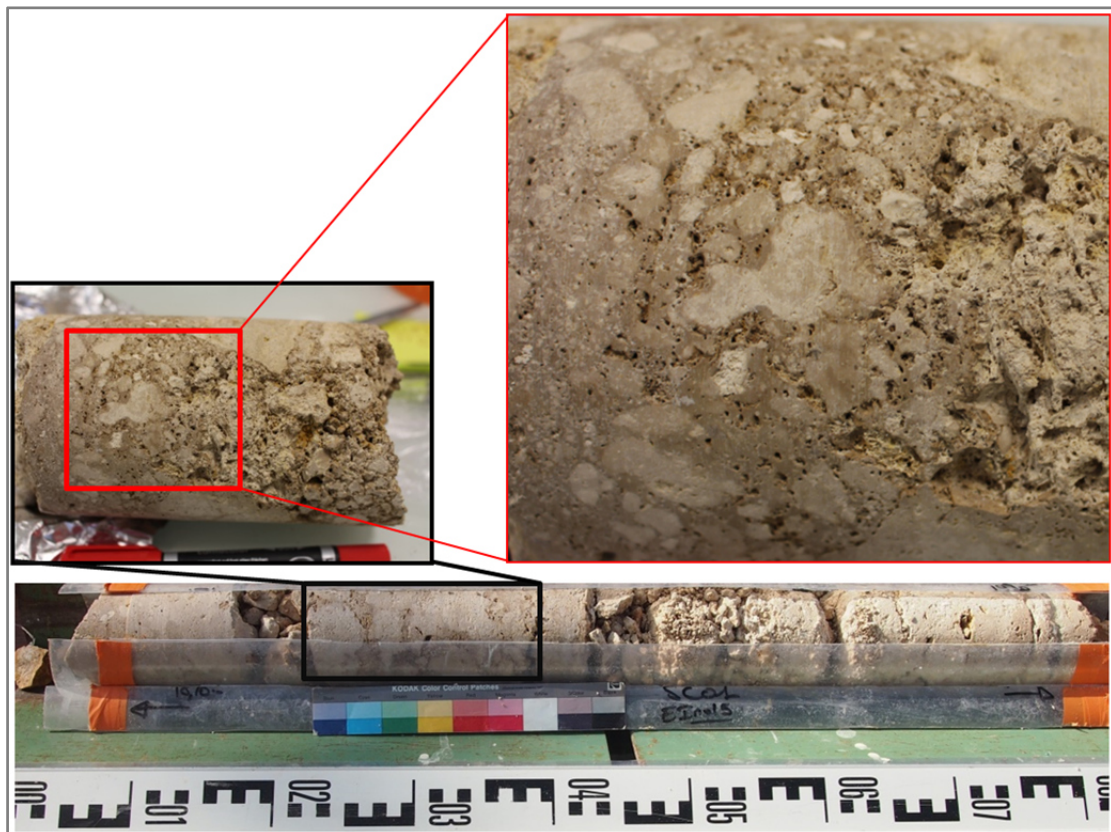


Figure 11- 30 EI-15 du SC1 (18,1 à 18,9 m). Calcaire blanchâtre avec présence de vacuoles de dissolution.



Figure 11- 31 EI-16 du SC1 (19,2 à 19,8 m). Calcaire blanchâtre fracturé avec zones dissolution et déstructuration.

Les analyses minéralogiques et géochimiques réalisées sur les matériaux de la ZNS aideront à mieux comprendre la circulation de l'eau dans ceux-ci.

Les figures 11-32, -33 et -34 présentent les coupes lithologiques synthétiques des trois sondages carottés de la ZNS avec les caractéristiques de chaque faciès. Une synthèse de la morphologie des faciès est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11- 1 Tableau de synthèse des principales caractéristiques morphologiques observées dans les matériaux de la ZNS du site d'étude.

Facies	Variété	Nature	Classe granulaire	Aspect	Couleur	Figure
Sol	-	Limons	Limon-argileux	Plastique	Marron brun	11-2
Marne	Sableuse	Calcaire	Sable (fin à moyen)	Friable	Blanchâtre	11-6
	Limoneuse	Calcaire	Limon fin-argileux	Mou	Beige	11-7
Intercalation (sable)	Grossier	Calcaire	Sableux grossier	Mou particulière	Beige	11-10
	Limoneux	Calcaire	Sable fin à limoneux	Mou particulière	Beige	11-9
Roche	Saine	Calcaire	Micritique (matrice)	Dur (cimenté)	Grisâtre	11-14
	Fracturée (saine)	Calcaire	Micritique (matrice)	Dur (cimenté)	Grisâtre	11-16, 11-17
	Fragmentée (saine)	Calcaire	Grave	Dur (cimenté)	Grisâtre	11-22, 11-23
	Altérée	Calcaire	Micritique-argileuse (matrice)	Dur (cimenté)	Grisâtre	11-25
	Vacuolaire	Calcaire	Micritique (matrice)	Dur (cimenté)	Grisâtre	11-30

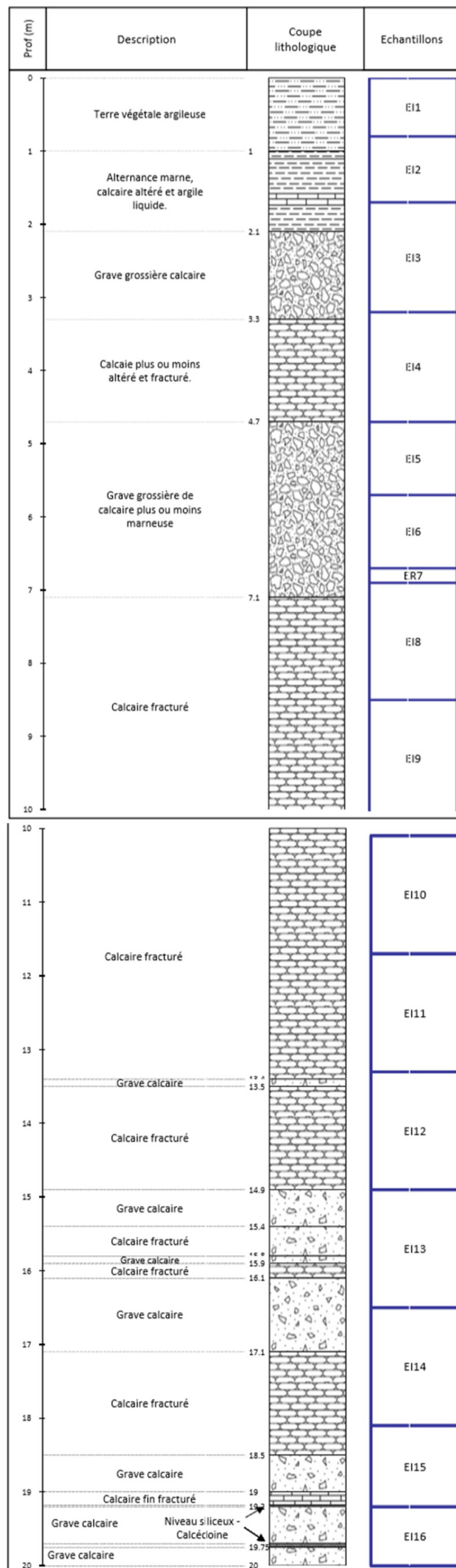


Figure 11- 32 Coupe lithologique du sondage carotté SC1 au lieu-dit « les Hôtels ».

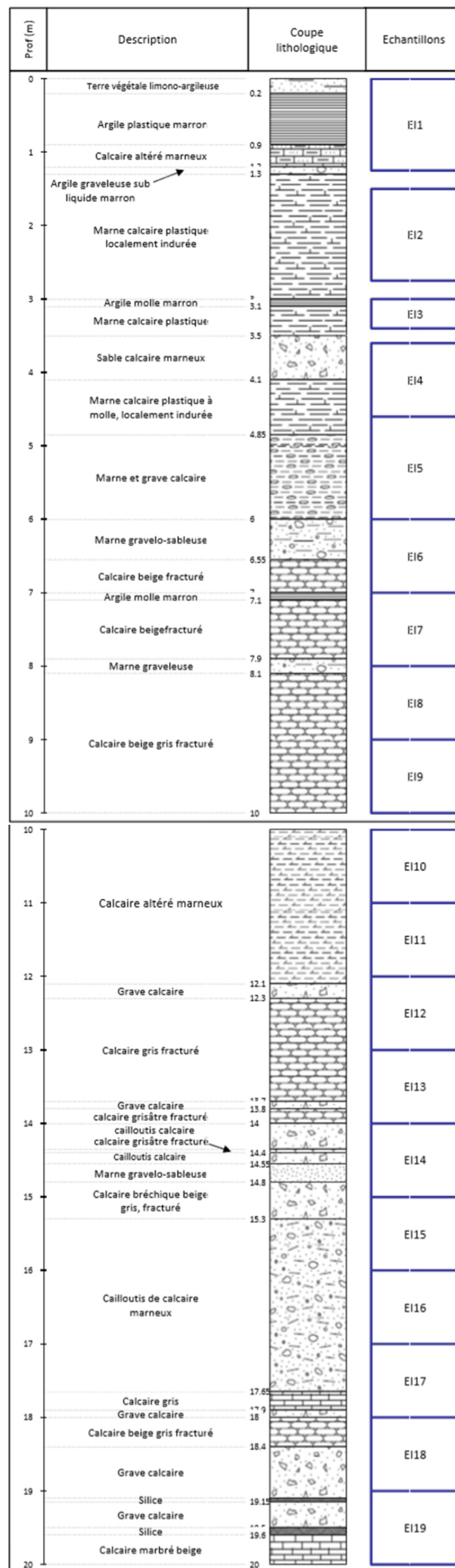


Figure 11- 33 Coupe lithologique du sondage carotté SC2 au lieu-dit « les Hôtels ».

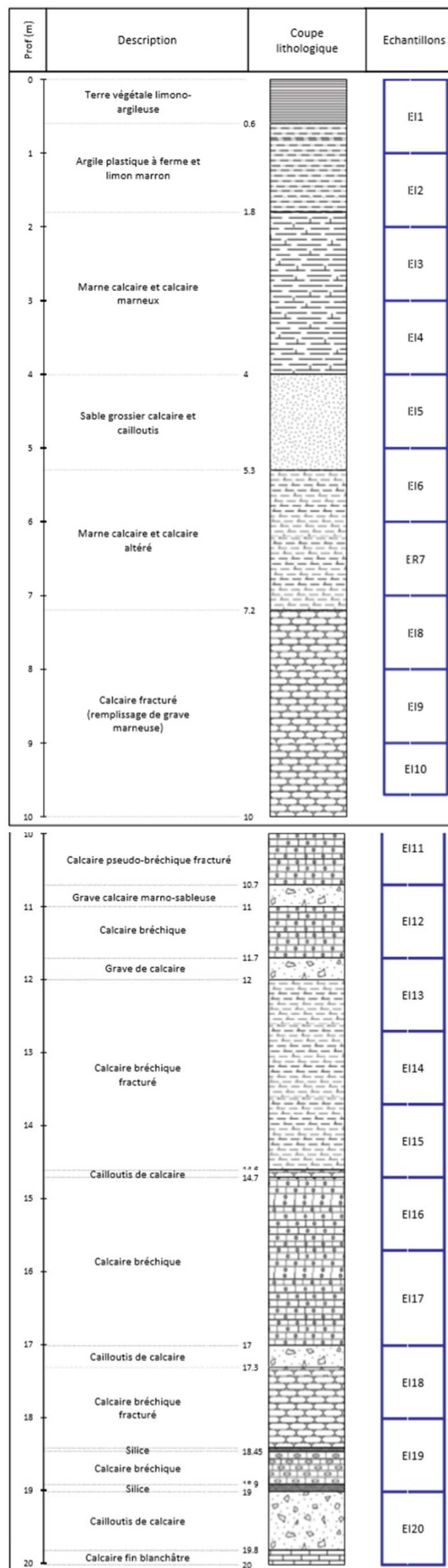


Figure 11- 34 Coupe lithologique du sondage carotté SC3 au lieu-dit « les Hôtels ».

CHAPITRE 12: CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES

DES MATERIAUX DE LA ZNS

Une série d'analyses de laboratoire a été faite pour caractériser les propriétés physiques des matériaux de la ZNS. Les résultats montrent une variabilité et une hétérogénéité parmi les faciès étudiés, qui confirment la description précédente.

Les sept premiers mètres de la ZNS, qui comprennent des matériaux meubles non consolidés, ont été caractérisés avec des techniques différentes de celles utilisées pour l'étude de la roche calcaire dure (tableau 12-1).

Tableau 12- 1 Tableau récapitulatif des techniques utilisées pour la détermination des propriétés physiques et géochimiques des matériaux de la ZNS en fonction des types de faciès. GRN : granulométrie et sédimentométrie (§9.1.1), SS : analyse de la surface spécifique (§9.1.3), ρ_s : mesure de la masse volumique de grains (§9.1.4.1), Φ : porosité totale et connectée (§9.1.4.2), DTP : distribution de taille de pores (§9.1.5), VS : vitesse des ondes (§9.1.6), DRX : diffraction de rayons X en poudre et en lame orientée (§9.2.1.1), OPT : analyse d'image avec le microscope optique et MEB : géochimie et analyse d'image à l'aide du microscope électronique à balayage (§9.2.1.2).

Faciès		Variété	Nature	Aspect	Technique d'analyse								
					GRN	ρ_s	SS	Φ	DTP	VS	DRX	OPT	MEB
Meuble	Sol	-	Calcaire	Plastique	x	x	x	x	x		x		
	Marne	Sableuse	Calcaire	Friable	x	x	x	x	x		x		
		Limoneuse	Calcaire	Molle	x	x	x	x	x		x		
	Intercalations (sable)	Grossier	Calcaire	Mou	x	x	x	x	x		x		
		Limoneux	Calcaire	Mou	x	x	x	x	x		x		
Dure	Roche	Saine	Calcaire	Dure		x		x		x	x	x	x
		Fracturée	Calcaire	Dure						x	x	x	x
		Fragmentée	Calcaire	Dure							x		
		Altérée	Calcaire	Dure				x		x	x	x	x
		Vacuolaire	Calcaire	Dure						x	x	x	x

Nous présenterons tout d'abord les analyses de granulométrie et de sédimentométrie réalisées sur les matériaux meubles.

12.1. Distribution de taille des particules

12.1.1. Granulométrie du sol

La figure 12-1 présente un exemple du faciès de sol (encadrement jaune) avant prélèvement. Il appartient à l'horizon non labouré du sol brun du SC1.



Figure 12- 1 Prélèvement d'un échantillon de sol (rectangle jaune) pour analyse granulométrique (30 à 40 cm, SC1).

La figure 12-2 montre les courbes de distribution pour les échantillons de sol brun des trois sondages carottés. Pour la totalité des échantillons de sol étudiés, la distribution de taille des particules est uniforme et développée dans le domaine de la taille des limons compris entre 2 et 50 μm . L'allure de la courbe est typique d'une granulométrie limoneuse homogène avec peu de particules au-delà de 50 μm .

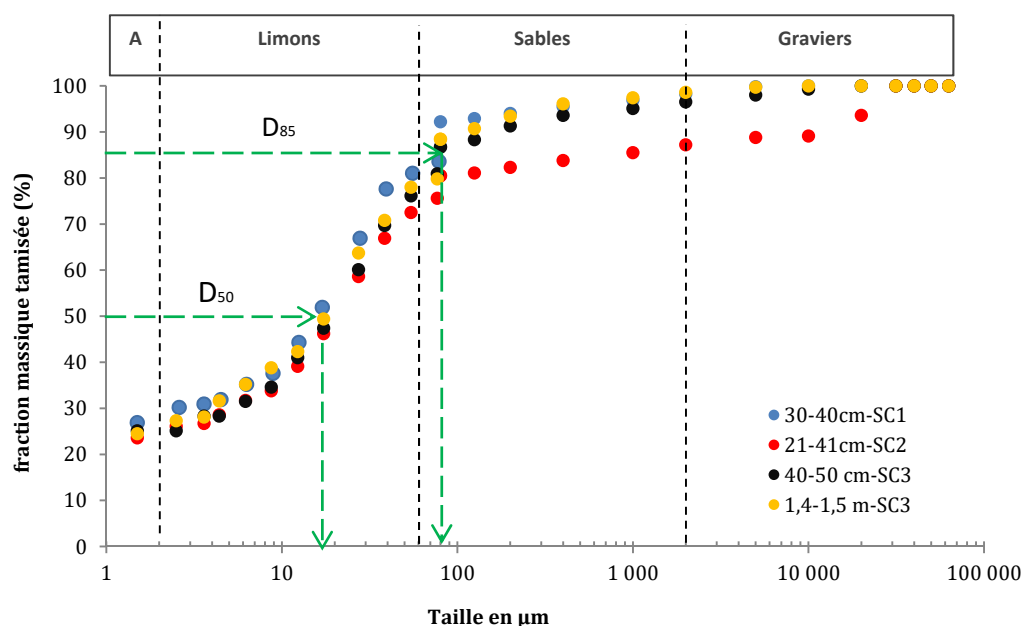


Figure 12- 2 Courbes de distribution en masse (%) de taille des grains d'échantillons de sol brun dans les trois sondages carottés.

Une faible quantité de grains de la taille des sables et des graves est observée dans l'ensemble des échantillons étudiés. Pour mieux visualiser la prédominance des tailles de particules, une graphique des fréquences pondérales est présenté dans la figure 12-3.

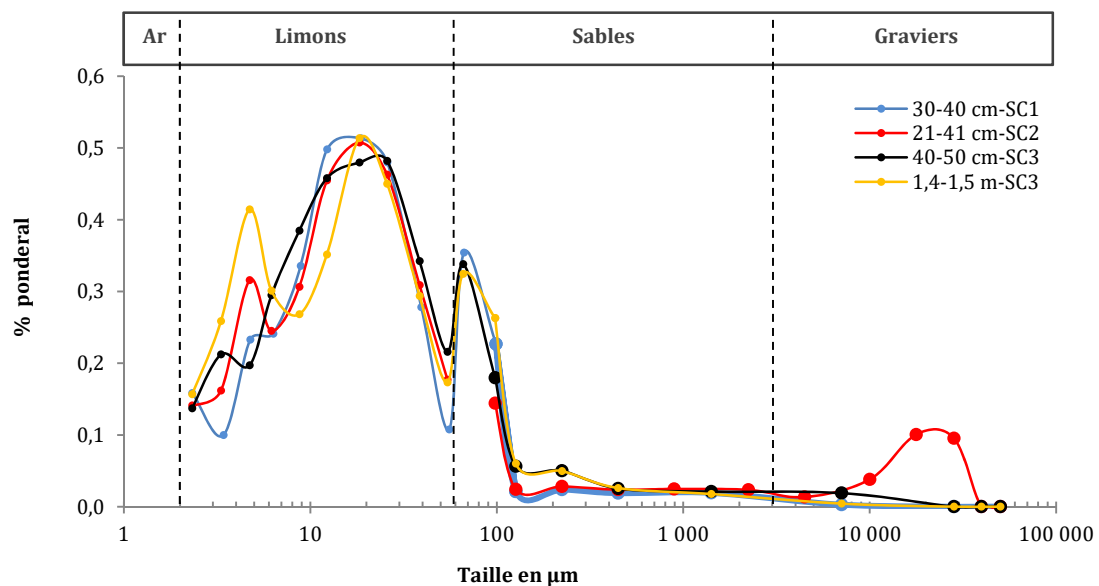


Figure 12- 3 Taille des particules en fréquence pondérale pour les échantillons de sol dans les trois sondages carottés.

Pour les échantillons de sol, on peut constater une distribution de taille de grains dans la gamme de limons avec un mode principal à 10-30 μm . Le pic observé à environ 70 μm est un artéfact lié au couplage des deux méthodes (granulométrie et sédimentométrie). Un seul échantillon de sol a montré une distribution bimodale avec un second mode à 17 mm (échantillon 21-41 cm-SC2).

12.1.2. Granulométrie de la marne calcaire

La figure 12-4 présente un exemple d'échantillon de marne prélevé dans la ZNS. Le prélèvement sur cette carotte a été fait entre 1,2 et 1,3 m de profondeur (rectangle rouge).



Figure 12- 4 Echantillon de marne calcaire prélevé (rectangle rouge) pour l'analyse granulométrique (1,2 à 1,3 m de profondeur-SC1).

Les échantillons de marne calcaire de la ZNS ont montré une granulométrie moins limoneuse et plus sableuse avec des courbes de distribution plus étalées dans la gamme

des graves et des sables (fig. 12-5). La teneur en particules sableuses dépasse dans tous les cas 30 % en poids, sauf pour l'échantillon 6,15-6,25 m de profondeur du SC2 qui a une texture limoneuse fine (gamme 2 – 20 μm).

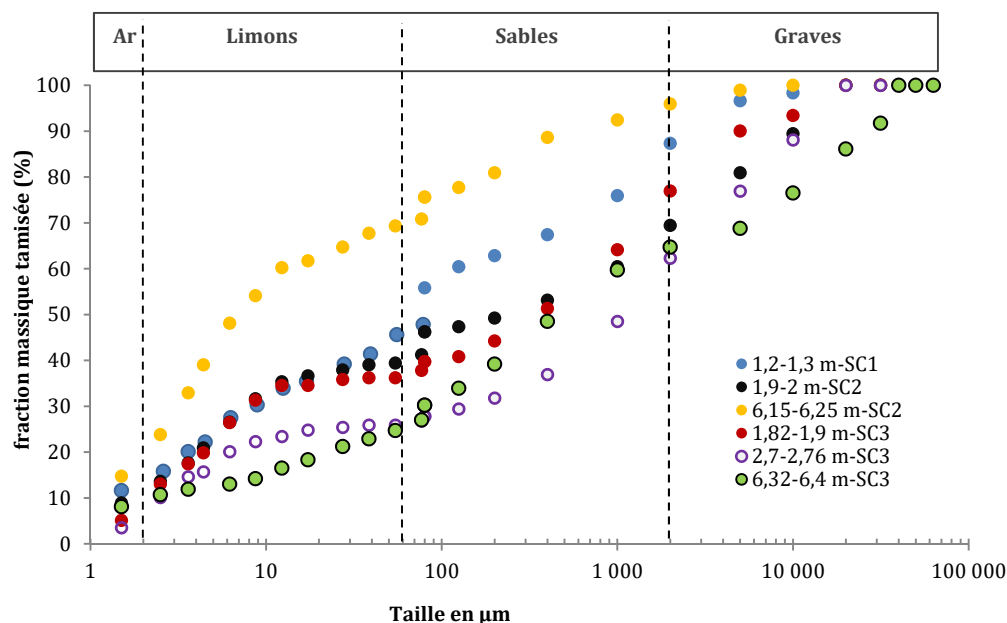


Figure 12-5 Courbes de distribution de taille des grains pour les échantillons de marne dans les trois sondages carottés.

L'échantillon 1,2-1,3 m-SC1 a une granulométrie intermédiaire entre le limon et le sable. Sa distribution est bien graduée, car les différentes tailles de particules sont présentes en quantités plus ou moins équivalentes (courbe presque linéaire). Les échantillons de marne calcaire du SC2 et SC3 possèdent aussi une granulométrie bien distribuée avec des valeurs de C_u élevées (tab.12.2, p.205) à exception de l'échantillon 6,15-6,25 m-SC2.

On observe une relativement bonne continuité horizontale de la granulométrie du faciès entre les forages SC2 et SC3 à certaines profondeurs, comme par exemple entre l'échantillon 1,9-2 m-SC2 et l'échantillon 1,82-1,9 m-SC3, qui ont tous les deux une granulométrie limono-sableuse. En revanche, pour les échantillons 6,15-6,25 m-SC2 et 6,32-6,4 m-SC3, il n'existe pas de continuité latérale du point de vue de leur granulométrie. Bien qu'ils se ressemblent beaucoup à l'œil nu (annexe 11-1), l'échantillon du SC3 présente une quantité beaucoup plus importante de particules grossières, ce qui n'a pas été repéré lors de l'inspection visuelle. Les échantillons avec les textures les plus grossières appartiennent au SC3, notamment les échantillons les plus profonds.

L'histogramme en fréquence pondérale obtenu pour les faciès marneux (fig. 12-6) montre une distribution multimodale caractérisée par la présence de trois modes : entre 2 et 8 μm correspondant à la gamme du limon fin, entre 60 et 130 μm correspondant à la gamme du sable fin et entre 500 et 3000 μm correspondant à la gamme du sable grossier. Les contributions les plus importantes sont celles liées aux grains de taille limoneuse et sableuse fine.

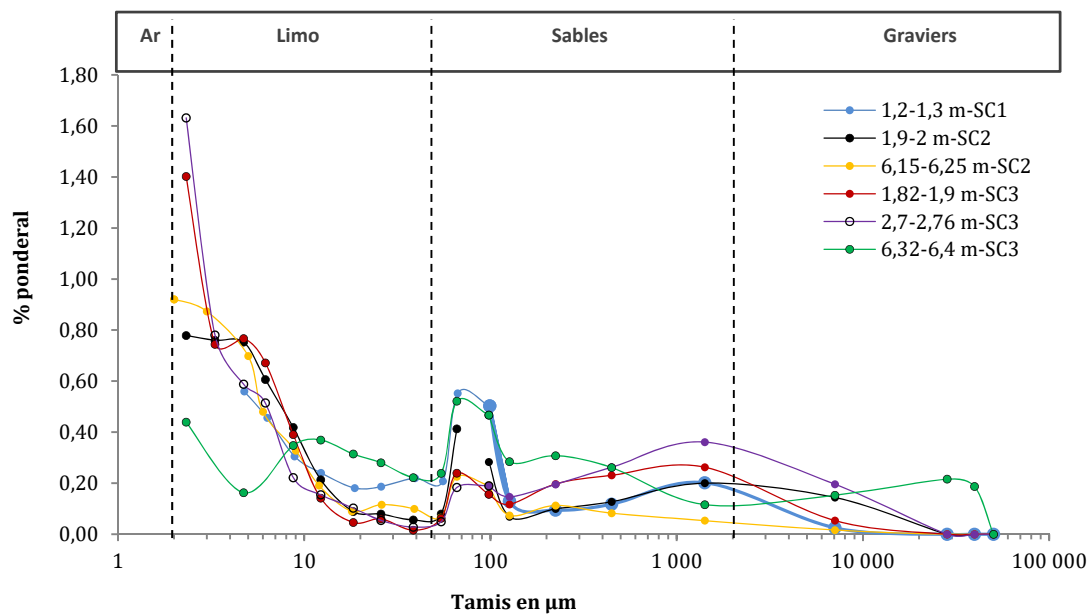


Figure 12- 6 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de marne dans les trois sondages carottés.

12.1.3. Granulométrie du faciès sable marneux

La granulométrie des échantillons sablo-marneux est décrite par les courbes des figures 12-7 et 12-10.

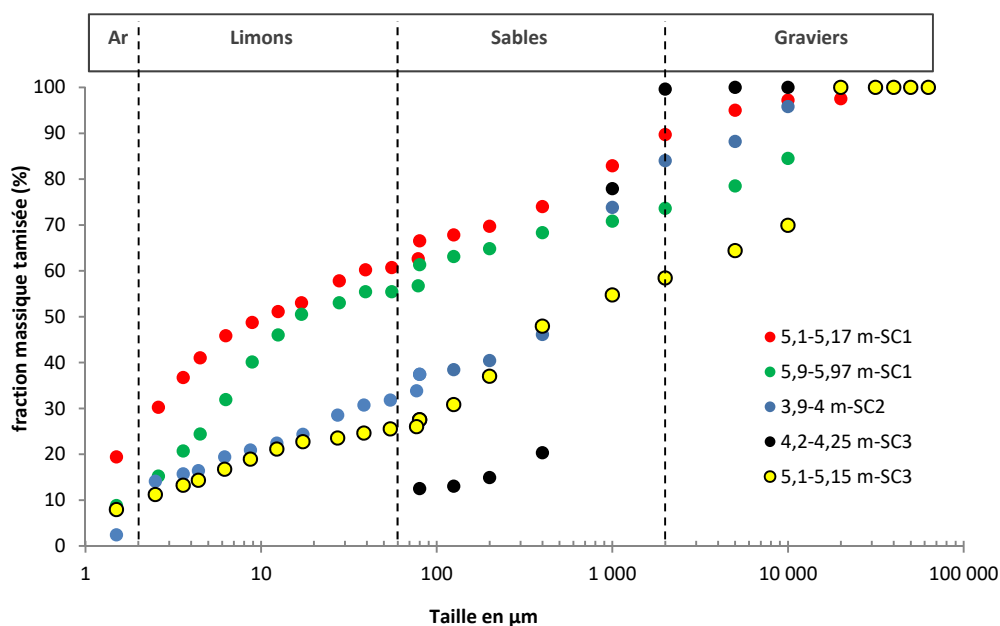


Figure 12- 7 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de sable dans les trois sondages carottés.

Les deux échantillons du SC1 montrent une granulométrie qui est particulièrement développée dans le domaine des limons, ce qui correspond à la description qualitative. Les échantillons 3,9-4 m-SC2 et 5,1-5,15 m-SC3 ont une distribution de taille de grain typique d'un sable avec une distribution uniforme dans le domaine des sables (de fin à grossier) et des valeurs de C_u élevées et un C_c entre 0,8 et 2,2 (tab. 12-2). L'échantillon 4,2-4,25 m-SC3 ne présente pas de phase limoneuse comme le reste des échantillons. Pendant les essais au laboratoire, le volume de particules fines n'a pas été suffisant pour faire les analyses de sédimentométrie et la presque totalité de particules était au-dessus de 60 µm de diamètre.

Les figures 12-8 et 12-9 permettent de comparer l'échantillon ayant plus de particules fines (5,1-5,17 m-SC1) à celui ayant des particules plus grossières (4,2-4,25 m-SC3). Bien qu'ils soient presque à la même profondeur, il y a une différence forte de texture peu détectable visuellement.



Figure 12- 8 Echantillon de sable marneux prélevé (rectangle rouge) pour l'analyse granulométrique (5,1-5,17m-SC1).



Figure 12- 9 Echantillon de sable prélevé (carré rouge) pour l'analyse granulométrique (prof : 4,2-4,25 m-SC3).

L'histogramme de la distribution de particules pour les échantillons de sable marneux est représenté sur la figure 12-10. La distribution est multimodale avec trois modes principaux : dans la gamme du sable grossier, avec une taille de grains comprise entre 200 et 1000 μm , ayant la contribution la plus importante, dans la gamme du sable fin, vers 70 μm , avec une contribution plus faible, et dans la gamme du limon.

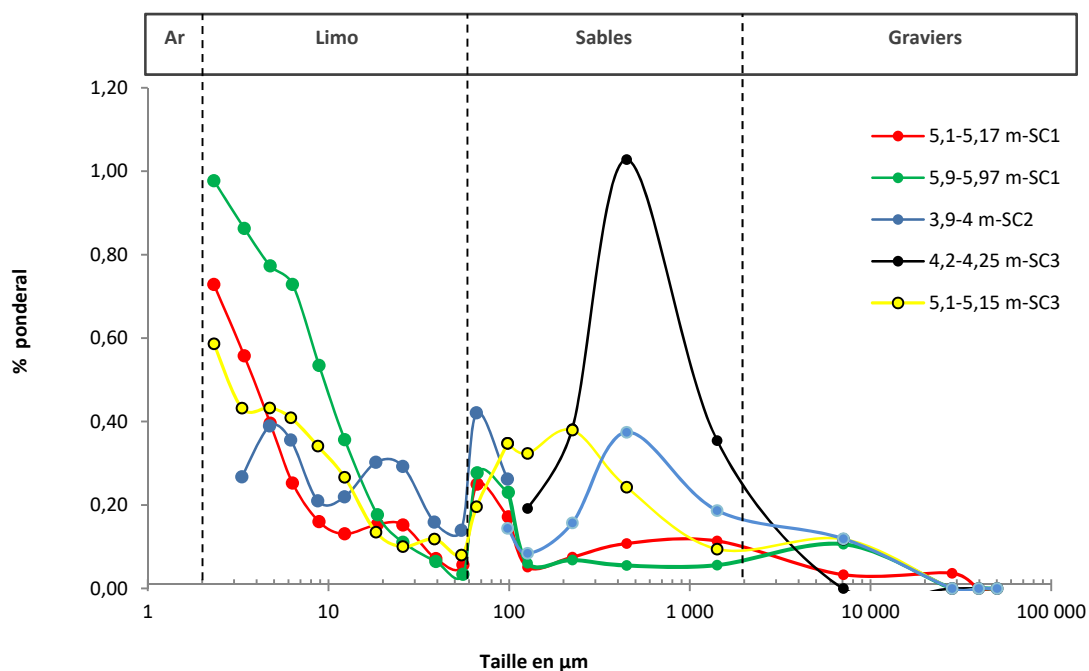


Figure 12- 10 Courbes de distribution de taille de grain pour les échantillons de sable dans les trois sondages carottés.

12.1.4. Synthèse

Une synthèse des toutes les données granulométriques est donnée dans le tableau 12-2, ainsi que dans le triangle de classification texturale de la figure 12-11. Les valeurs de pourcentages sont normalisées en rassemblant les teneurs en sables et en graves.

Tableau 12-2 Tableau récapitulatif des données granulométriques.

Faciès	Echantillon	D ₅₀ (microns)	D _{max} (mm)	C _u	C _c	D ₈₅ /D ₁₅	Fractions normalisées					Granulométrie
							% A (< 2µm)	% L (2-60 µm)	Sables		Graviers (>2mm)	
									% F (60-80 µm)	% M-G (0,08-2 mm)		
Sol brun	30-40 cm-SC1	18	6	-	-	-	28,5	53	10,7	6	1,8	Limon argileux
	21-41 cm-SC2	18	25	-	-	-	24,9	48,4	7,2	6,7	12,8	Limon
	40-50 cm-SC3	18	13	-	-	-	25,1	51,9	9,7	9,8	3,5	Limon fin
	1,4-1,5 m-SC3	18	7	-	-	-	25,8	52,6	10	10,2	1,4	Limon fin
Marne (calcaire altéré)	1,2-1,3 m-SC1	78	18	133,3	0,3	790,4	13,9	32,5	9,4	31,5	12,7	Limon sableux
	1,9-2 m SC2	200	20	578	0	2611,6	11,4	28,5	6,3	23,2	30,6	Limon sableux
	6,15-6,25 m-SC2	6,15	8	-	-	203,6	19,2	50,4	6	20,3	4,1	Limon fin
	1,82-1,9 m-SC3	300	17	380,3	0	1282,6	9,1	27,4	3,2	37,2	23,1	Limon sableux
	2,7-2,76 m-SC3	1000	19	732,3	4,4	2227,2	6,8	19,3	1,7	34,5	37,7	Limon sableux
	6,32 m-6,4-SC3	400	35	475,6	2,7	1891,7	9,4	15,9	4,9	34,5	35,3	Limon sableux
Sable marneux	5,1-5,17 m-SC1	9	30	-	-	-	24,8	34	7,7	23,2	10,3	Limon
	5,9-5,97 m-SC1	17	20	48	0,2	4178,1	12,2	43,6	5,5	12,3	26,4	Limon
	3,9-4 m-SC2	500	20	322,2	0,8	860,6	8,1	24,1	5,2	46,6	16	Limon sableux
	4,2-4,25 m-SC3	1000	<5	-	-	6,5	12,5			87,1	0,4	Sable
	5,1-5,15 m-SC3	500	30	1303	2,2	4204,1	9,5	16,1	1,9	30,9	41,6	Limon sableux

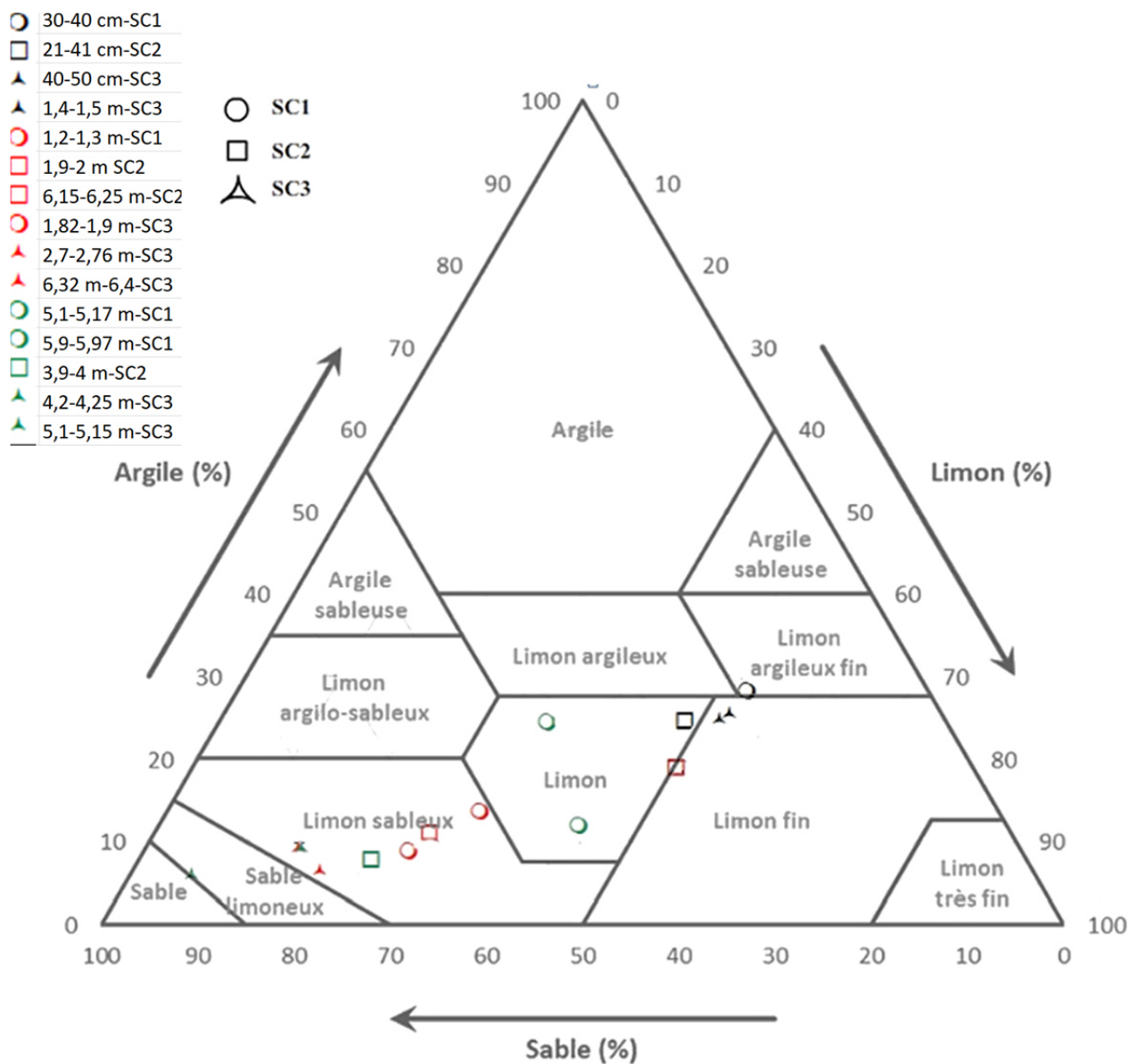


Figure 12- 11 Position des échantillons dans le triangle des textures. La fraction sable s'étend de 50 μ m aux graviers de plus de 2 mm. En noir, les échantillons de sol, en rouge les échantillons de marne et en vert les échantillons de sable.

12.2. Surface spécifique des matériaux

12.2.1. Surface spécifique du sol limono-argileux

La courbe caractéristique d'adsorption d'un échantillon représentatif du sol (brunisol) est présentée dans la figure 12-12. L'endroit du prélèvement dans la carotte SC3 est représenté par l'encadré jaune dans la figure 12-13.

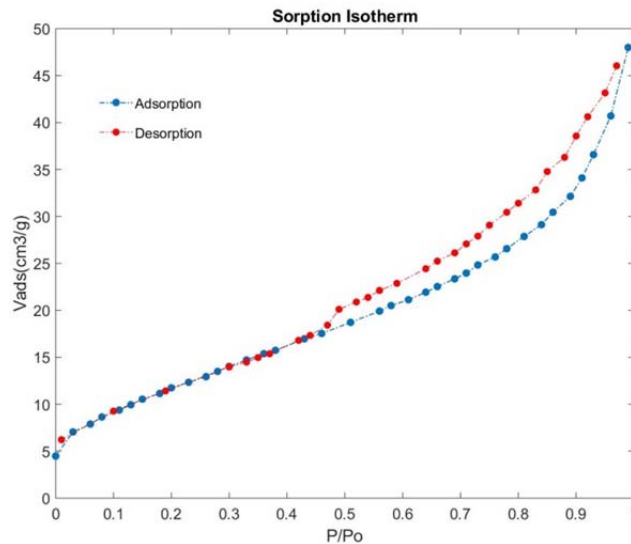


Figure 12- 12 Données d'adsorption isotherme pour un échantillon de sol (1,4-1,5 m-SC3).



Figure 12- 13 Prélèvement d'un échantillon de sol (rectangle jaune) pour un analyse de surface spécifique de grains (1,4-1,5 m-SC3).

Dans la figure 12-12, on observe une courbe d'adsorption - désorption d'azote avec un phénomène d'hystérésis entre les valeurs de pression relatives 0,42 et 1. Ce type de courbe correspond au type IV selon la classification des isothermes d'adsorption de l'IUPAC (fig. 9-3). Cela est aussi constaté par la valeur relativement élevée du coefficient C ($C = 38$, tableau 12-3). La boucle d'hystérésis est associée à la condensation capillaire dans les mésopores. Elle peut être comparée au type d'hystérésis H3 (fig. 9-3-b) dont les pores présentent une géométrie en forme de fissures rectangulaires (« *slit-like pores* »). Le point de fermeture de la boucle est à $(P/P_0) = 0,42$ ce qui correspond bien au point d'ébullition de l'azote à la température de l'essai (77 K).

Tableau 12- 3 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains de l'échantillon de sol (1,4-1,5 m-SC3) et les paramètres BET. m est la pente de la courbe, i est l'intersection à l'ordonnée.

Méthode BET		
P/P_0	V_{ad} (cm ³ /g)	$1/\{V_{ad} [(P_0/P)-1]\}$ (cm ³)
0,06	7,889	7,45E-03
0,08	8,642	1,02E-02
0,11	9,3794	1,29E-02
0,13	9,948	1,50E-02
0,15	10 5445	1,73E-02
0,18	11,147	1,96E-02
0,20	11,746	2,19E-02
0,23	12,337	2,41E-02
0,26	12,935	2,65E-02
0,28	13,493	2,88E-02
0,30	14 010	3,10E-02
0,33	14,713	3,40E-02
0,36	15,379	3,71E-02

Paramètres de la courbe	
Pente m : 0,0945	Intersect. i : 0,0025
erreur m : 0,0005	erreur i : 0,0001
R^2 : 0,9997	erreur V_m : 0,0002

Paramètres du model BET	
V_m (cm ³ /g)	10,31
C (adim)	38,21
S_{BET} (m ² /g)	44,87

Pour calculer la surface spécifique des grains, la courbe obtenue à l'aide du modèle BET est tracée dans la figure 12-14. L'intervalle de la courbe d'adsorption choisi pour faire le calcul est compris entre les valeurs de pression relative $0,05 < (P/P_0) < 0,35$ étant donné que la courbe d'adsorption est presque linéaire, ce qui correspond à une couverture de la surface de grains par la première couche d'azote adsorbée.

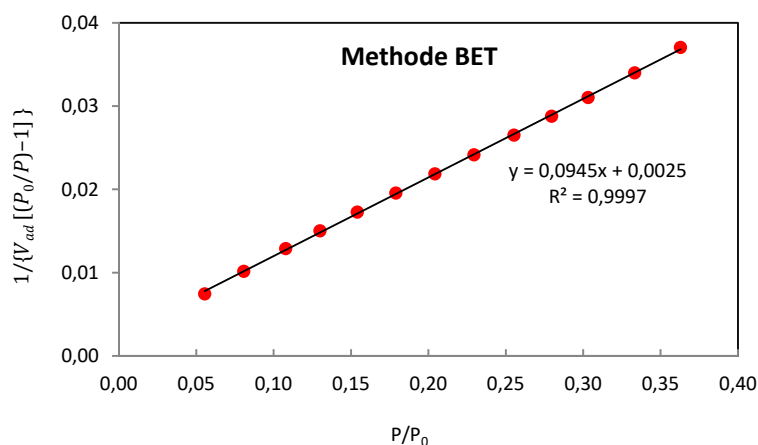


Figure 12- 14 Droite BET à partir de données d'adsorption isotherme (1,4-1,5 m-SC3).

Les données utilisées pour les calculs de la surface spécifique des grains (SSG) sont affichées dans le tableau 12-3 à gauche et le tableau à droite résume les paramètres calculés. Les valeurs de capacité volumique de la première couche (V_m) et les valeurs de la surface spécifique (S_{BET}) sont 10,3 cm³/g et 44,87 m²/g respectivement.

Pour déterminer la contribution des mésopores et des micropores à la surface spécifique, le modèle V-t a été appliqué. Les données sont présentées dans la figure 12-15. L'échantillon analysé appartient à l'intervalle de profondeur compris entre 1 et 1,1 m dans le SC3 (carré rouge, figure 12-13).

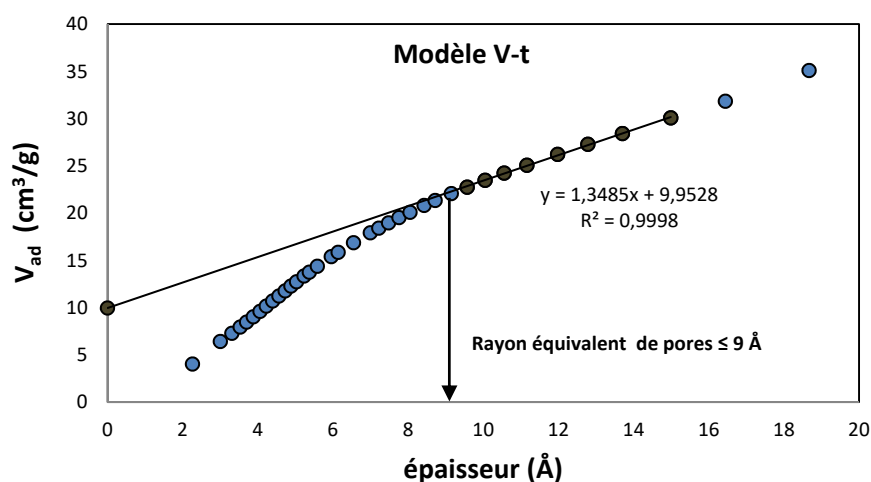


Figure 12- 15 Données d'après le modèle V-t: V_{ad} en fonction de l'épaisseur t de la couche de molécules d'azote (1-1,1 m-SC3).

L'intervalle de (P/P_0) utilisé pour faire les calculs avec le modèle V-t est différent de celui utilisé pour le modèle BET. Dans la plupart des cas, l'intervalle de P/P_0 lié aux méso et micropores est $0,45 < (P/P_0) < 0,95$ (fig. 12-12). Dans la figure 12-15, l'intersection avec l'ordonnée est positive, ce qui confirme la présence d'une microporosité. Cette valeur est liée au volume de micropores présents dans le matériau. Pour cet échantillon, le volume de micropores est égal à $0,0154 \text{ cm}^3\text{/g}$ et sa contribution est de $19,79 \text{ m}^2\text{/g}$ (environ 49 % du total). Le tableau 12-4 présente les valeurs obtenues à l'aide de la méthode V-t.

Tableau 12-4 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains d'un échantillon de sol (1-1,1 m-SC3) et les paramètres du modèle V-t.

Méthode V-t		
P/P_0	$V_{ad} \text{ (cm}^3\text{/g)}$	$t \text{ (}\text{\AA}\text{)}$
0,76	22,74	9,57
0,79	23,46	10,05
0,81	24,23	10,56
0,84	25,06	11,16
0,86	26,21	11,98
0,89	27,28	12,79
0,91	28,41	13,71
0,94	30,07	14,99

Paramètres de la courbe	
Pente m: 1,3485	Intersect. i: 9,9528
erreur m: 0,0180	erreur i: 0,2162
R^2 : 0,9989	erreur V_m : 0,0898

Paramètres du model V-t	
$V_{MP} \text{ (cm}^3\text{/g)}$	0,0154
$S_t \text{ (m}^2\text{/g)}$	20,86
$S_{MP} \text{ (m}^2\text{/g)}$	19,79

12.2.2. Surface spécifique des marnes

On peut observer une courbe d'adsorption isotherme d'un échantillon marneux représentatif du faciès dans la figure 12-16. Sur la figure 12-17, on observe l'intervalle marneux échantillonné du sondage carotté 2.

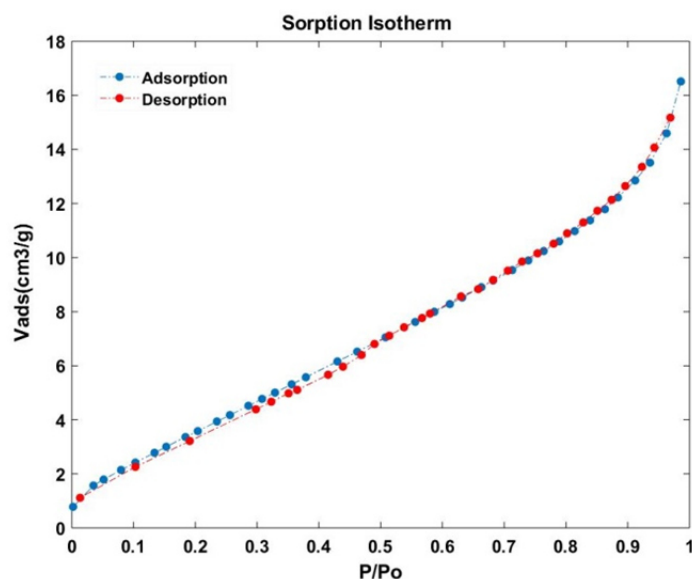


Figure 12- 16 Données d'adsorption isotherme pour un échantillon de marne (2,7-2,8 m-SC2).



Figure 12- 17 Prélèvement d'un échantillon de sol (carré rouge) pour l'analyse de surface spécifique de grains (2,7-2,8 m-SC2).

Les données d'adsorption obtenues correspondant aux faciès dits marneux décrivent une courbe avec très peu ou pas d'hystérésis (fig. 12-16). Parmi les échantillons classés comme marne, 10 sur 14 ont une adsorption isotherme sans hystérésis. Cela veut dire que la présence de mésopores (2-50 nm) est quasiment négligeable.

La courbe décrite par le processus d'adsorption-désorption est de type II, selon la classification de l'IUPAC (fig. 9-3-a). En absence de la boucle d'hystérésis, la présence de macropores est prépondérante par rapport aux mésopores.

Les données obtenues avec la méthode BET pour le même échantillon sont affichées dans la figure 12-18.

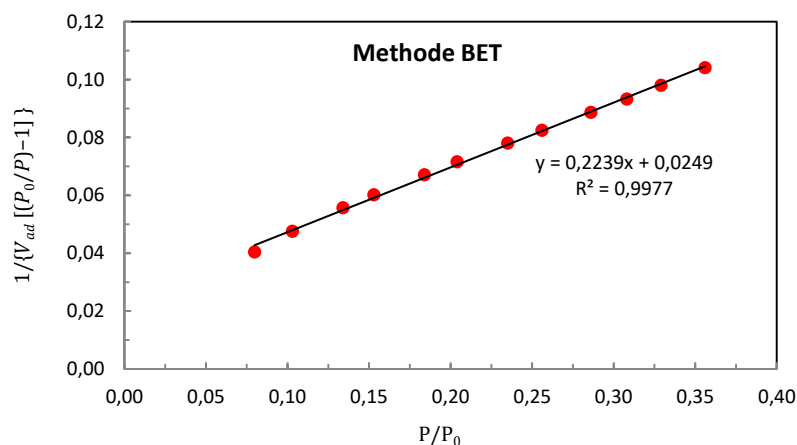


Figure 12- 18 Courbe BET à partir de données d'adsorption isotherme (2,7-2,8 m-SC2).

Tableau 12- 5 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique de grains d'un échantillon de marne et les paramètres BET (2,7-2,8 m-SC2).

Méthode BET			Paramètres de la courbe	
P/P ₀	V _{ad} (cm ³ /g)	P/P ₀ /V(1-P/P ₀)	Pente m: 0,2239	Intersect i: 0,0249
0,05	1,791	3,04E-02	erreur m: 0,0034	erreur i: 0,0008
0,08	2,145	4,04E-02	R ² : 0,9977	erreur V _m : 0,0010
0,10	2,416	4,75E-02	Paramètres du model BET	
0,13	2,780	5,57E-02	V _m (cm ³)	4,02
0,15	3,003	6,02E-02	C (adim)	10
0,18	3,362	6,71E-02	S _{BET} (m ² /g)	17,49
0,20	3,582	7,16E-02		
0,24	3,938	7,80E-02		
0,26	4,175	8,24E-02		
0,29	4,519	8,86E-02		
0,31	4,773	9,32E-02		
0,33	5,004	9,80E-02		
0,36	5,311	1,04E-01		

Pour repérer la présence des micropores, les données obtenues pour le même échantillon ont été traitées avec la méthode V-t (fig. 12-19).

Une microporosité est présente, avec une taille de pores d'environ 16 Å. La valeur de surface spécifique de micropores est de 5,9 m²/g (tableau 12-6 droite), c'est-à-dire environ 34 % de contribution par rapport à la surface totale réactive.

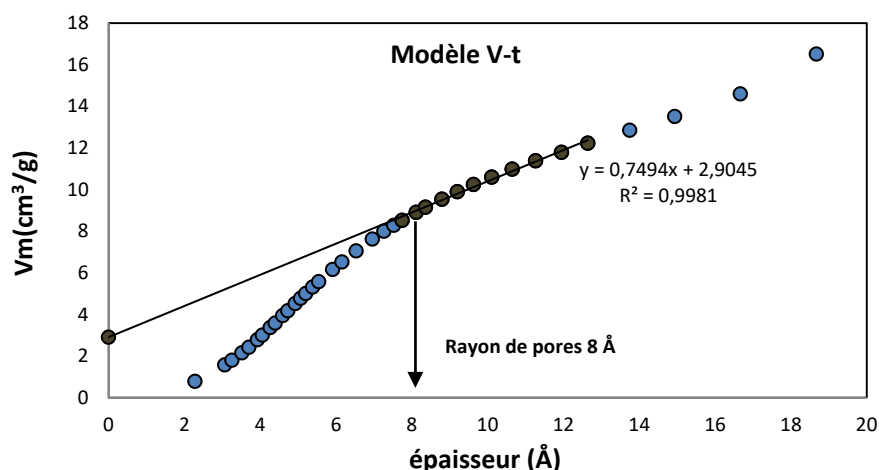


Figure 12- 19 Données d'après le modèle V-t: V_{ad} en fonction de l'épaisseur t de la surface de molécules d'azote. (2,7-2,8 m-SC2).

Tableau 12- 6. Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique de grains d'un échantillon de marne et les paramètres V-t (2,7-2,8 m-SC2).

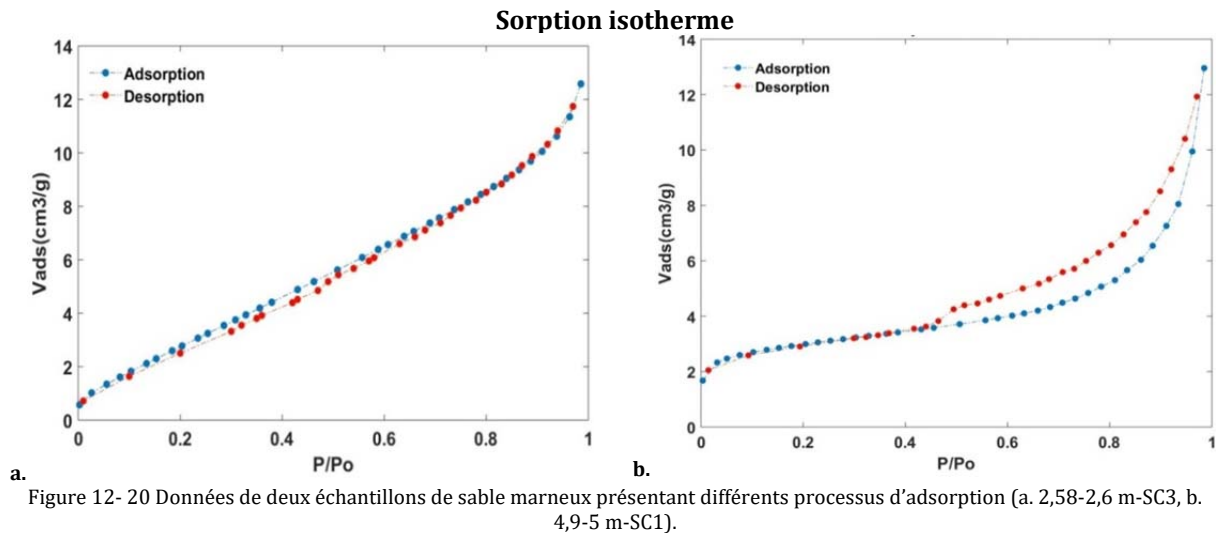
Méthode V-t		
P/P ₀	V _{ad} (cm ³ /g)	t (Å)
0,63	8,52	7,744
0,66	8,91	8,114
0,68	9,15	8,359
0,71	9,54	8,794
0,74	9,89	9,198
0,76	10,24	9,628
0,79	10,60	10,108
0,81	10,98	10,649

Paramètres de la courbe	
Pente m: 0,749	Intersect. i: 2,90
erreur m: 0,0226	erreur i: 0,2255
R ² : 0,99	erreur V _m : 0,0116

Paramètres du modèle V-t	
V _{MP} (cm ³ /g)	4,49E-03
S _t (m ² /g)	11,593
S _{MP} (m ² /g)	5,90

12.2.3. Surface spécifique des sables marneux

Les courbes d'adsorption des échantillons de sables marneux présentent une hétérogénéité par rapport aux phénomènes d'hystérésis et donc les mésopores peuvent exister ou pas. Parmi les échantillons classifiés comme les sables marneux, 5 sur 9 (55 %) montrent une boucle d'hystérèse adsorption-désorption. Cependant, les valeurs moyennes de surface spécifique sont les plus faibles parmi les trois faciès meubles de la ZNS. Dans la figure 12-20, on présente deux courbes représentatives des échantillons de sables pour montrer les deux types observés.



Dans la figure 12-20-a, la présence d'hystérésis n'est pas flagrante. La courbe d'adsorption-désorption est de type II. La courbe de la figure 12-20-b, liée à un autre échantillon, montre une boucle d'hystérésis assez marquée entre $P/P_0 = 0,42$ et $0,99$ et donc elle est de type IV (fig. 9-3-a). La forme de la boucle correspond à une mésoporosité de type H4 dont les pores présentent une géométrie en forme de fissures rectangulaires aplaties (« *narrow slit-like pores* ») (fig. 9-3-b). Les volumes d'azote adsorbés (V_{ad}) par la surface des grains dépassent rarement les $12 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Les données calculées selon le modèle BET sont présentées dans la figure 12-21 en lien avec le tableau 12-7 ci-après. Pour l'échantillon 4,9-5 m-SC1, $C < 0$ à cause d'une intersection négative avec l'ordonnée (fig. 12-21-b), ce qui peut remettre en question l'application du modèle BET pour cet échantillon.

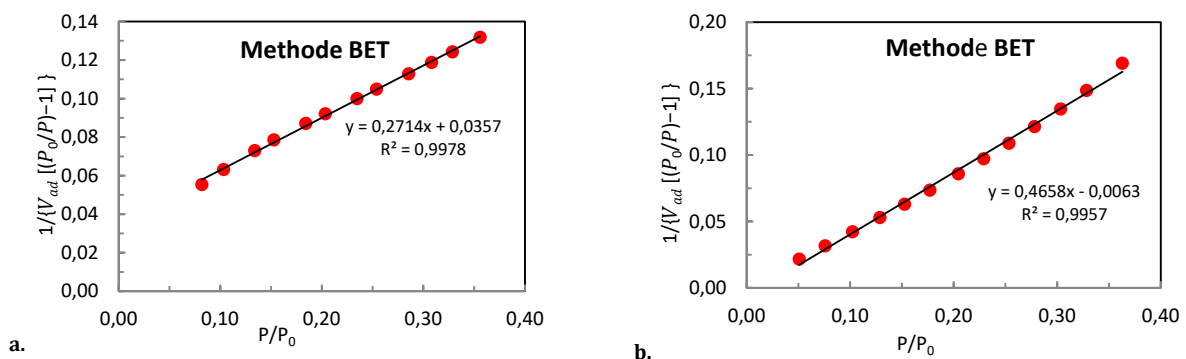


Tableau 12-7 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains des échantillons de sable et paramètres du modèle BET (gauche : 2,58-2,6 m-SC3, droite : 4,9-5 m-SC1).

Paramètres de la courbe		Paramètres de la courbe	
Pente m : 0,2714	Intersect. i : 0,0357	Pente m : 0,4658	Intersect. i : -0,0063
Erreur m : 0,0040	Erreur i : 0,0009	Erreur m : 0,0093	Erreur i : 0,0021
R ² : 0,9978	Erreur V _m : 0,0012	R ² : 0,9957	Erreur V _m : 0,0032

Equations du model BET		Equations du model BET	
V _m (cm ³)	3,26	V _m (cm ³)	2,18
C (adim)	8,59	C (adim)	-72,51
S _{BET} (m ² /g)	14,17	S _{BET} (m ² /g)	9,48

Les calculs des paramètres pour la détection de microporosité (modèle V-t) sont présentés dans le tableau 12-8. On peut constater que l'échantillon 2,58-2,6 m-SC3 possède une contribution de micropores légèrement plus importante (fig. 12-22-a), malgré l'absence de mésoporosité (fig. 12-20-a).

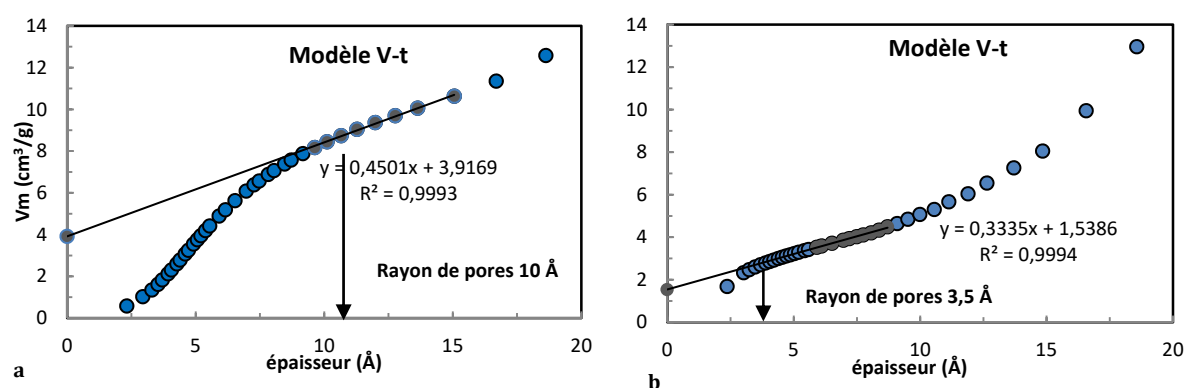


Figure 12- 22 Données d'après le modèle V-t: V_{ad} pour deux échantillons de sable de la ZNS (a : 2,58-2,6 m-SC3, b : 4,9-5 m-SC1)

Tableau 12- 8 Données d'adsorption utilisées pour calculer la surface spécifique des grains des échantillons de sable et paramètres du modèle V-t (gauche : 2,58-2,6 m-SC3, droite : 4,9-5 m-SC1).

Paramètres B		Paramètres B	
Pente m : 0,45	Intersect. i : 3,92	Pente m : 0,33	Intersect. i : 1,54
Erreur m : 0,011	Erreur i : 0,14	Erreur m : 0,007479555	Erreur i : 0,055
R ² : 0,996	Erreur V _m : 0,058	R ² : 0,995993033	Erreur V _m : 0,021

t-plot B		t-plot B	
V _{MP} (cm ³ /g)	6,06E-03	V _{MP} (cm ³ /g)	2,38E-03
S _t (m ² /g)	6,96	S _t (m ² /g)	5,160
S _{MP} (m ² /g)	7,21	S _{MP} (m ² /g)	4,32

Le tableau 12-9 et la figure 12-23 présentent l'ensemble des résultats des analyses de surface spécifique des matériaux meubles de la ZNS. Les courbes de sorption des autres échantillons sont dans l'annexe 12-1. L'histogramme de la figure 12-23 présente les valeurs de surface spécifique des échantillons en fonction de leur profondeur. Les

valeurs moyennes les plus élevées sont observées pour les échantillons de sol lesquels ont aussi la contribution réactive de micropores la plus importante (18 m²/g). Viennent ensuite des échantillons de marnes, issues de l'altération du calcaire, qui ne présentent généralement pas de phénomènes d'hystérésis et, en dernier, les échantillons de sables marneux, lesquels peuvent présenter une hystérésis.

Tableau 12- 9 Récapitulatif des données de surface spécifique des grains pour les échantillons meubles de la ZNS.

Faciès	Numérotation (prof.)	Hystérésis	Calculs (m²/g)			
			S _{BET}	S _t		
Sol brun	30-40 cm-SC1	OUI	42,13	18,48		
	50-60 cm-SC2	OUI	28,92	13,68		
	40-50 cm-SC3	OUI	40,65	19,79		
	1,4- 1,5 m-SC3	OUI	44,87	13,56		
			MOY : 39,14 m²/g CV : 26,17 %	MOY : 17,97 m²/g CV : 19,72 %		
Marnes	1,2-1,3 m-SC1	NON	27,96	13,22		
	1,5-1,6 m-SC1	NON	2,7	-		
	3,3-3,4 m-SC1	NON	17,95	9,52		
	5,4-5,5 m-SC1	OUI	11,48	5,02		
	1,2-1,3 m-SC2	NON	8,59	4,81		
	1,5-1,6 m -SC2	OUI	12,73	5,07		
	1,9-2 m SC2	NON	8,29	3,71		
	2,7-2,8 m-SC2	NON	17,49	5,9		
	3,3-3,4 m-SC2	NON	10,84	2,74		
	6,15-6,25 m-SC2	OUI	12,48	4,99		
	1,82-1,9 m-SC3	NON	4,24	2,95		
	2,7-2,76 m-SC3	NON	28,33	8,68		
	5,5-5,6 m-SC3	NON	25,21	8,96		
			6,32 m-6,4-SC3	OUI	10,36	4,05
			MOY : 14,9 m²/g CV : 57,7 %	MOY : 6,12 m²/g CV : 50,22 %		
Sables marneux	4,2-4,3 m-SC1	OUI	4,43	0,28		
	4,9-5-SC1	OUI	9,48	4,32		
	5,9-5,97 m-SC1	OUI	3,47	2,21		
	3,9-4 m-SC2	NON	23,59	3,09		
	4,8-5 m-SC2	NON	22,63	2,73		
	5,3-5,4 m-SC2	OUI	8,28	4,03		
	2,58-2,6 m-SC3	NON	14,17	7,21		
	4,2-4,25 m-SC3	OUI	7,2	3,77		
			5,1-5,15 m-SC3	NON	6,78	3,2
			MOY : 11,11 m²/g CV : 67,14 %	MOY : 3,43 m²/g CV : 54,23 %		

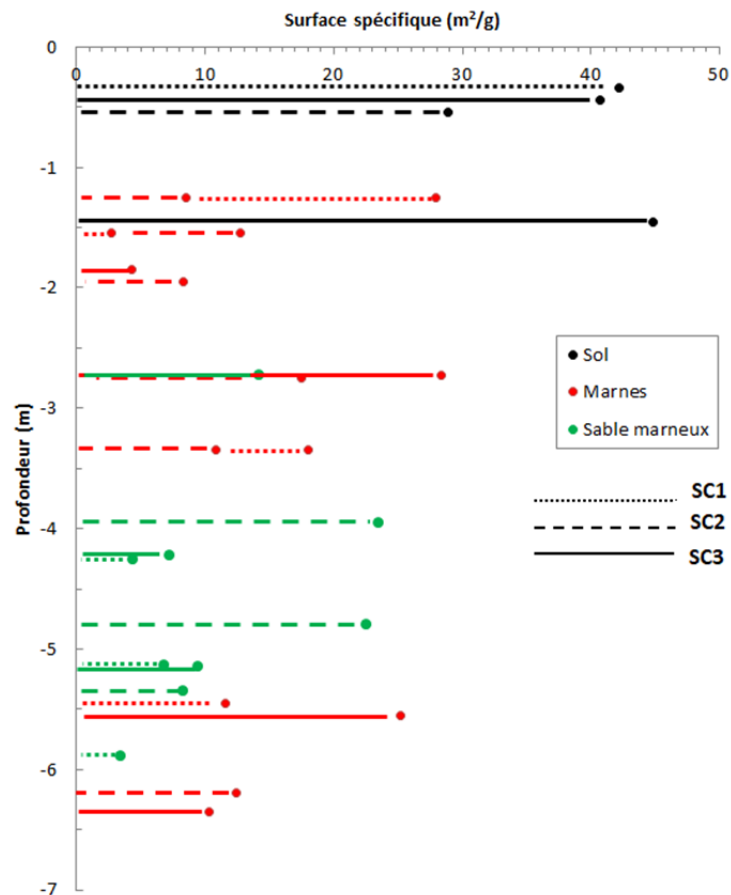


Figure 12- 23 Valeurs de la surface spécifique des échantillons meubles de la ZNS en fonction de la profondeur pour chaque sondage carotté.

12.3. Résultats des analyses au bleu de méthylène

Les résultats d'adsorption du bleu de méthylène (BM) sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 12- 10 Résultats des analyses d'adsorption de BM selon la norme NF P 94-068 (AFNOR, 1998).

Faciès	I.D	<2 μm (%)	Surface spécifique (m^2/g)	VBM ($\text{g}_{\text{BM}}/\text{g}$)	Classification NF P 94-068
Sol	30-40 cm-SC1	28,5	42,13	4,4	Sol limoneux-argileux
	40-50 cm-SC3	25,1	40,65	3,3	Sol limoneux-argileux
	1,4-1,5 m-SC3	25,8	44,87	4,4	Sol limoneux-argileux
Marne	1,2-1,25 m-SC2	13,9	27,96	1,7	Sol limoneux
	1,25- 1,28 SC2	16,2	8,59	1,8	Sol limoneux
	2,7-2,8 m-SC2	11,4	17,49	1,2	Sol limoneux
	6,15-6,25 m-SC2	19,2	12,48	1,4	Sol limoneux
	3,25-3,35 m-SC3	4,8	10,84	0,2	Sol sableux
Sable marneux	3,9-4 m-SC2	8,1	23,59	0,9	Sol limoneux

Les valeurs obtenues de concentration en BM pour les échantillons de sol sont les plus élevées parmi les faciès étudiés. Les échantillons de marnes présentent des valeurs environ trois fois plus faibles que les échantillons de sol et, pour le faciès sableux, la seule valeur mesurée est la valeur la plus basse à l'exception de l'échantillon de marne 3,25-3,35 m-SC3. Ces données sont présentées également dans la figure 12-24 pour

observer la relation entre le % de fraction < 2 μm , la surface spécifique et l'adsorption du bleu de méthylène.

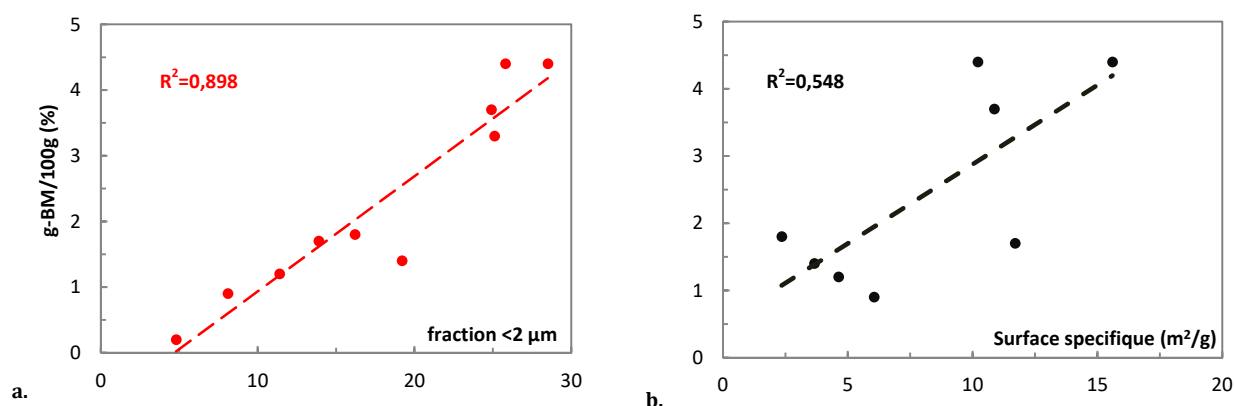


Figure 12- 24 Relation entre l'adsorption de BM et a) la teneur en fraction argileuse, b) la surface spécifique, pour tous les échantillons étudiés.

La figure 12-24-a présente une relation plus ou moins linéaire entre l'adsorption du BM et le taux d'argiles granulométrique. La linéarité entre le % BM et la surface spécifique est moins bonne ($R^2=0,548$). Le fait que les analyses de surface spécifique ont été réalisées sur l'ensemble de chaque échantillon et que, en revanche, les échantillons utilisés pour les essais de BM aient été broyés et tamisés, pourrait expliquer cette différence.

12.4. Porosité des matériaux

12.4.1. Porosité connectée, porosité totale et masses volumiques

La valeur moyenne de porosité connectée des échantillons de sol est de 45,2 %, de 35,6 % pour les échantillons de marnes, de 36,7 % pour les échantillons sableux et d'environ 11,05 % pour les faciès de roche dure, ce qui est relativement élevé pour une roche calcaire massive (tableau 12-11).

Tableau 12- 11 Données de porosité et de masse volumique apparente des échantillons de la ZNS. ρ_b :masse volumique apparente, Φ_e : porosité connectée, Φ_T : porosité totale et Φ_{nc} : porosité non connectée. Les données en rouge ne sont pas cohérentes.

Faciès	I.D	ρ_b (g/cm ³) Laboratoire	ρ_b (g/cm ³) Diagraphie	Φ_e (%)	Φ_t (%)	Φ_{nc} (%)
Sol	40-45 cm-SC1	1,69	-	44,6	37,4	-7,2
	45-50 cm-SC1	1,65	-	43,1	38,9	-4,2
	60-70 cm-SC2	1,62	1,58	45,9	40,0	-5,9
	70-80 cm-SC2	1,48	1,56	44,4	45,2	0,8
	1,5-1,6 m-SC3	1,59	1,43	48,0	41,1	-6,9
	MOY :	1,61	1,52	45,2	40,5	-
Marne	CV (%) :	5,0	5,4	4,1	7,3	-
	1,2-1,25 m-SC2	1,64	1,67	36,6	39,3	2,7
	1,25- 1,28-SC2	1,64	1,64	34,1	39,3	5,2
	4,42-4,6 m-SC2	1,64	1,62	37,2	39,3	2,1
	6,3-6,35 m-SC2	1,72	1,80	34,8	36,3	1,5
	MOY :	1,66	1,68	35,64	38,6	2,9
Sable	CV (%) :	2,6	4,8	3,7	4,3	56,5
	5-5,1 m-SC1	1,62	1,67	30,7	40,0	9,3
	3,6-3,9 m-SC2	1,62	1,82	36,8	40,0	3,2
	4-4,2 m-SC3	1,56	1,82	42,4	42,2	-0,2
	MOY :	1,60	1,77	36,7	40,7	4,3
	CV (%) :	2,2	4,9	16,0	3,1	69,0
Roche	5,1-5,25 m-SC2	1,98	1,65	21,6	26,8	5,2
	6,8-6,9 m-SC2	2,31	2,02	12,6	14,4	1,8
	7,45-7,55 m-SC2	2,38	2,16	9,6	11,9	2,3
	9,7-9,8 m-SC2	2,38	1,9	11,7	12,2	0,5
	11-11,1 m-SC2	2,55	2,18	4,7	5,6	0,9
	13,2-13,3 m-SC2	2,31	2,18	12,0	14,4	2,4
	14,59-14,68 m - SC2	2,46	2,04	5,8	8,9	3,1
	16,1-16,2 m-SC2	2,29	2,12	10,4	15,2	4,8
	MOY :	2,33	2,03	11,05	13,7	2,6
	CV (%) :	7,1	8,95	46,5	45,2	60,2

Le coefficient de variation des roches est le plus grand. Ce fait est dû à la variabilité de l'état dans lequel on trouve les faciès de roche dure. La valeur la plus élevée de porosité connectée appartient à l'échantillon 5,1-5,25 m – SC2 (fig. 12-25-c) avec une valeur de 21,6 % et la valeur la plus faible appartient à l'échantillon 11-11,05 m–SC2 avec une valeur de 4,7% (fig. 12-25-h). Dans les faciès de roche, on observe des fissures et des cavités. Par exemple, l'échantillon 7,45-7,55 m–SC2 (fig. 12-25-e) présente des fissures millimétriques perceptibles à l'œil nu. Cet échantillon a une porosité connectée de 19,6 %. Les échantillons 13,2-13,3 m–SC2 (fig. 12-25-f) et 16,1-16,2 m–SC2 (fig. 12-25-d) n'ont pas de fissures, mais ils ont des nombreuses cavités millimétriques qui contribuent probablement à la porosité connectée. Les deux roches ont des valeurs proches de porosité connectée et de porosité totale (tableau 12-11).

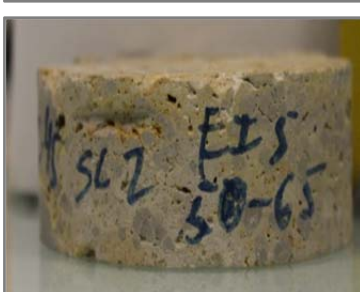
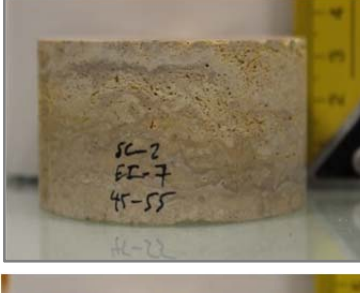
70-80 cm-SC2	a.		
4,42-4,6 m-SC2	b.		
5,1-5,25 m-SC2	c.		
16,1-16,2 m-SC2	d.		
7,45-7,55 m-SC2	e.		
13,2-13,3 m-SC2	f.		

Figure 12- 25 Echantillons représentatifs des faciès de la ZNS.

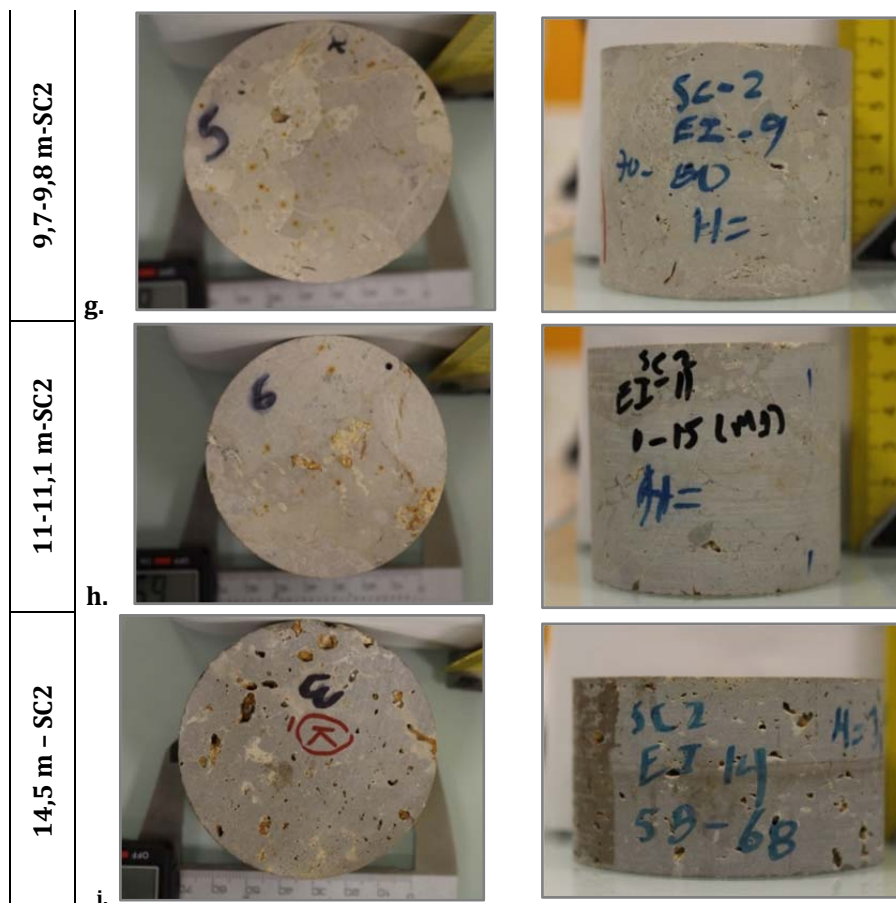


Figure 12- 25 (suite) Echantillons représentatifs des faciès de la ZNS

Les mesures de masse volumique apparente pour les échantillons de sol sont comprises entre 1,48 et 1,69 g/cm³. Les sables ont des valeurs comprises entre 1,56 et 1,62 g/cm³. Les marnes se trouvent entre 1,64 et 1,72 g/cm³. Les échantillons de roche ont les valeurs les plus élevées (entre 1,98 et 2,55 g/cm³). Les valeurs de masse volumique apparente mesurées en laboratoire sont comparées avec celles mesurées sur le terrain à l'aide de l'outil de diagraphie de type « density » (tableau 12-11). Les mesures de terrain pour les sols sont plus faibles que celles obtenues dans le laboratoire. Ce résultat est cohérent, car la masse volumique apparente d'un échantillon humide est généralement plus faible que la masse volumique apparente du même échantillon sec. Les valeurs de masse volumique apparente obtenues pour les échantillons de marne sont cohérentes avec les mesures de laboratoire. En revanche, les valeurs sont différentes pour les faciès sableux. La différence entre les deux méthodes au niveau des matériaux meubles pourrait être liée à la façon dont la sonde de diagraphie mesure la densité du milieu. La profondeur de pénétration et le volume de formation mesurée pourraient détecter de matériaux massifs (graviers), qui ne sont pas pris en compte dans les mesures au

laboratoire. Les résultats de diagraphies obtenus pour la roche dure, eux aussi, ne sont pas cohérents avec ceux obtenus en laboratoire. Les mesures de terrain sont plus faibles que celles du laboratoire étant donné la prise en compte des fractures du matériau sur le terrain. Cet espace vide fait diminuer la valeur de masse volumique apparente de la roche.

Les masses volumiques du solide, ρ_s , ont été mesurées à l'aide d'un pycnomètre (tableau 12-12). Des valeurs moyennes de ρ_s ont été utilisées pour les calculs de Φ_T , car l'analyse a été sélective. La valeur ρ_s considérée pour les particules de roche dure est de 2,71 g/cm³ étant donné l'absence de données pour la roche dure.

Tableau 12- 12 Données de masse volumique des particules. (*) valeur obtenue de la littérature.

Faciès	I.D	ρ_s (g/cm³)
Sol	30-40 cm-SC1	2,61
	45-50 cm-SC1	2,66
	21-41 cm-SC2	2,61
	40-50 cm-SC3	2,63
	1,4-1,5 m-SC3	2,65
	MOY :	2,63
Marne	CV(%)	0,87
	0,9-1,3 m-SC2	2,67
	2,4-2,6 m-SC2	2,68
	6,15-6,25 m-SC2	2,68
	3,25-3,35 m-SC3	2,69
	MOY :	2,68
Sable	CV(%)	0,30
	3,9-4 m-SC2	2,67
Roche	(*)	2,71

Les valeurs de porosité totale sont cohérentes avec les données de porosité efficace (connectée), sauf pour les échantillons de sol (à exception de l'échantillon 70-80 cm-SC2). Les points noirs au-dessus de la courbe $\Phi_e = \Phi_t$ ne sont pas cohérents, car la porosité connectée est toujours inférieure ou égale à la porosité totale (fig. 12-26).

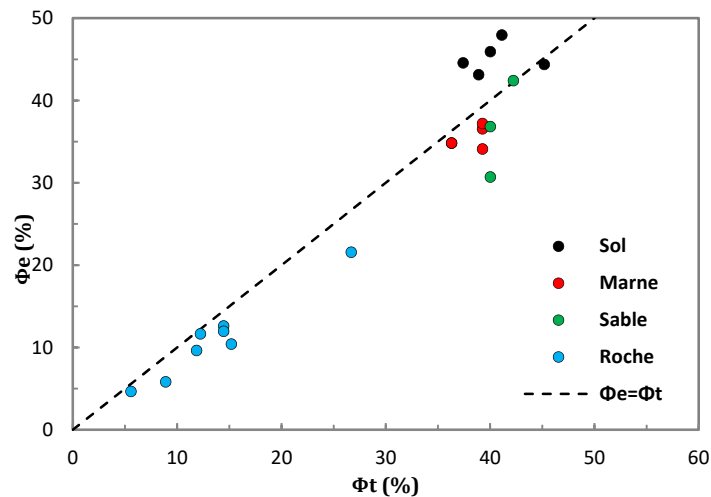


Figure 12- 26 Echantillons représentatifs des faciès de la ZNS.

Ce décalage est probablement lié à une surestimation du volume de vides dans l'échantillon (volume d'eau total qui sature l'échantillon lors de l'essai multistep) utilisé pour calculer la porosité efficace (eq. 9-14).

Les échantillons de marne et de sable possèdent très peu de porosité non connectée, car les valeurs obtenues sont proches de $\Phi_e = \Phi_t$, sauf certains échantillons (marne à 1,25-1,28 m-SC2 et sable à 5-5,1 m-SC1) qui s'en éloignent un peu et dont la porosité occluse peut être liée à des cailloutis imperméables, qui ne participent pas au stockage d'eau. Deux échantillons de roches ne possèdent que très peu de porosité non connectée. Il s'agit des échantillons 9,7-9,8 m-SC2 et 11-11,1 m-SC2 (fig. 12-25-g et -h).

12.5. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (roches dures)

Les mesures de porosité des roches dures ont été couplées avec des mesures de vitesse des ondes, afin de confirmer les valeurs obtenues par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature pour une roche calcaire dure (5 à 15 %, Rivera, 2004). Cette analyse est à mettre en regard de l'hétérogénéité de la géométrie des pores (fissures, vacuoles) dans les roches de la ZNS étudiée.

La propagation des ondes est plus rapide dans l'axe longitudinal (compression) que dans le plan transversal (cisaillement) (tableau 12-13).

Tableau 12- 13 Valeurs mesurées des vitesses propagation des ondes pour des échantillons de roche.

I.D	Epaisseur (cm)	Compression (NF-P94-411)		Cisaillement (NF-P94-411)		Φ_t
		V_p (m/s)	Moyenne V_p	V_s (m/s)	Moyenne V_s	
5,1-5,25 m-SC2	2,45 cm	1885	1901	1380	1380	26,8
		1917		1380		
6,8-6,9 m-SC2	3,4 cm	3238	3336	1921	1921	14,4
		3434		1921		
7,45-7,55 m-SC2	3,48 cm	3337	3555	1856	1876	11,9
		3772		1896		
9,7-9,8 m-SC2	6,35 cm	3191	3191	2021	2004	12,2
		3191		1986		
11-11,1 m-SC2	5,73 cm	3269	3411	2080	2003	5,6
		3553		1926		
13,2-13,3 m-SC2	4,45 cm	3771	3624	1943	1961	14,4
		3477		1978		
14,59-14,68 m-SC2	3,97 cm	4041	4271	2188	2188	8,9
		4500		2188		
16,1-16,2 m-SC2	3,87 cm	3822	3648	2042	2001	15,2
		3474		1959		

*Reference : La vitesse des ondes dans l'air est de 340 m/s, dans l'eau est de 1500 m/s et dans l'acier est de 5000 m/s.

On observe une corrélation, avec une vitesse des ondes qui décroît pour des valeurs de porosité plus grandes (fig. 12-27).

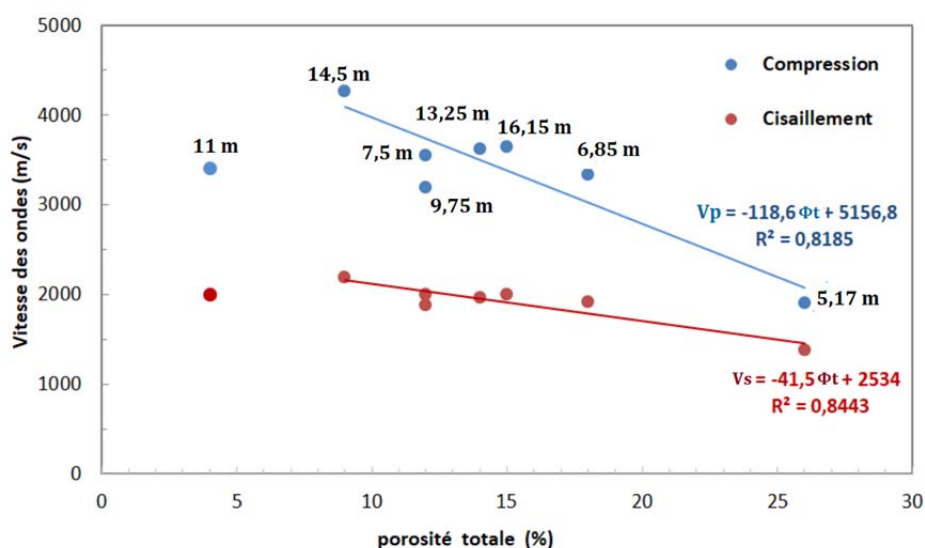


Figure 12- 27 Relations entre vitesse des ondes en compression (V_p), vitesse des ondes en cisaillement (V_s) et la porosité totale de la roche (Φ_t).

Il existe quand même une variabilité dans les valeurs de V_p et V_s par rapport à Φ_t qui peut être liée à la géométrie de pores, comme par exemple les valeurs obtenues pour l'échantillon 9,7-9,8 m-SC2 et l'échantillon 11-11,1 m-SC2 (fig. 12-27). Les mesures de porosité sur ces deux échantillons ont montré précédemment que la presque totalité de leurs pores sont connectés (tab. 12-11).

L'échantillon 9,7-9,8 m-SC2 semble avoir une faible porosité selon ses caractéristiques visuelles (fig. 12-25-g). En revanche, sa porosité totale mesurée est relativement élevée

(12,2 %, tab. 12-11). Si on observe la valeur de la vitesse des ondes, elle est plus faible que prévue (en dessous de la courbe) ce qui donne des indices de la présence de vides internes non connectés qui contribuent à la porosité totale.

L'échantillon 11-11,1 m-SC2 possède la porosité la plus faible parmi tous les échantillons étudiés (tableau 12-11) et donc la valeur de vitesse des ondes devrait être la plus élevée. Néanmoins, ce n'est pas le cas. Probablement, il existe des microfissures ou des cavités à l'intérieur de l'échantillon ce qui ralentit la propagation des ondes à la même vitesse qu'un échantillon ayant plus de vides (porosité totale plus élevée). Selon les résultats obtenus de porosité connectée, il est probable que ces microfissures se trouvent tout au long de sa hauteur ce qui peut expliquer l'atténuation de la vitesse des ondes plus importantes en compression qu'en cisaillement enregistrée pour cet échantillon.

L'échantillon 14,59-14,68 m-SC2 possède les valeurs de V_p et V_s les plus élevées parmi les échantillons de roche étudiés, malgré les nombreuses cavités observées à la surface de l'échantillon (fig. 12-25-i). Cet échantillon ne possède pas des fissures selon l'inspection visuelle. Il est possible que très peu de ces cavités soient connectées à l'intérieur de l'échantillon vu la vitesse de propagation des ondes élevée par rapport aux autres échantillons de roche.

12.6. Courbes cumulatives d'intrusion de mercure et de distribution de taille des pores

Les données obtenues à l'aide du porosimètre à mercure sont présentées selon a) le volume cumulé d'intrusion et b) l'incrément de l'intrusion. L'intrusion cumulée donne une idée du volume poral du matériau, tandis que l'incrément de l'intrusion permet d'obtenir la distribution de taille des pores.

12.6.1. *Echantillons de sol*

La figure 12-28 présente les données de l'échantillon 30-40 cm-SC1 représentatif du sol. Deux types de pores ont été identifiés selon la courbe rouge de distribution. Le pic plus

net se trouve à 1 μm tandis que le deuxième type de pores présente une gamme de diamètre entre 280 et 830 μm .

A l'échelle des nanopores (entre 0,01-0,05 μm), on observe du bruit et très peu de contribution, ce qui rend difficile la détection d'une nanoporosité inférieure à 10 nm de rayon de pores équivalent. Cependant, vers 10 nm (0,01 μm), on observe des incréments non nuls, qui peuvent signaler la présence d'une nanoporosité (mésopores selon l'IUPAC), du même type que celle observée via les courbes d'adsorption isotherme et qui sont les responsables des phénomènes d'hystérésis pendant l'adsorption des molécules d'azote (§12.2.1).

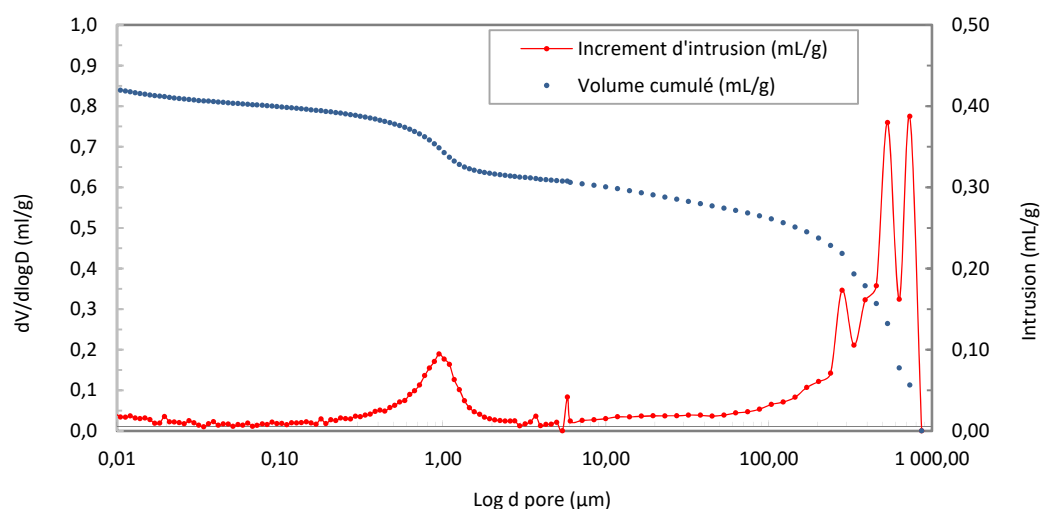


Figure 12- 28 Données de volume et différentiel de volume en fonction du diamètre de pore équivalent pour un échantillon de sol (30-40 cm-SC1).

L'intrusion cumulée totale enregistré est de 0,43 mL-Hg/g-ech (courbe bleue, fig. 12-28)

12.6.2. Marnes

La distribution de taille de pores observée dans les échantillons de marne montre une porosité caractérisée par trois tailles de pores bien définies. Sur la figure 12-29, on observe les deux courbes correspondant à l'échantillon 2,65-2,75 m-SC2, représentatif du faciès marneux. Une porosité importante est observée vers 202 et vers 620 μm , caractérisée par deux pics de fréquence (courbe rouge), pour lesquels l'intrusion a été instantanée, probablement liée à des fissures. La deuxième taille de pores est décrite par le mode à 0,44 μm . La présence de nanopores (mésopores dans la nomenclature IUPAC) n'est pas observée dans cet échantillon (§12.2.2), en cohérence avec les isothermes de sorption de N_2 . Le volume cumulé total est de 0,36 mL-Hg/g-ech.

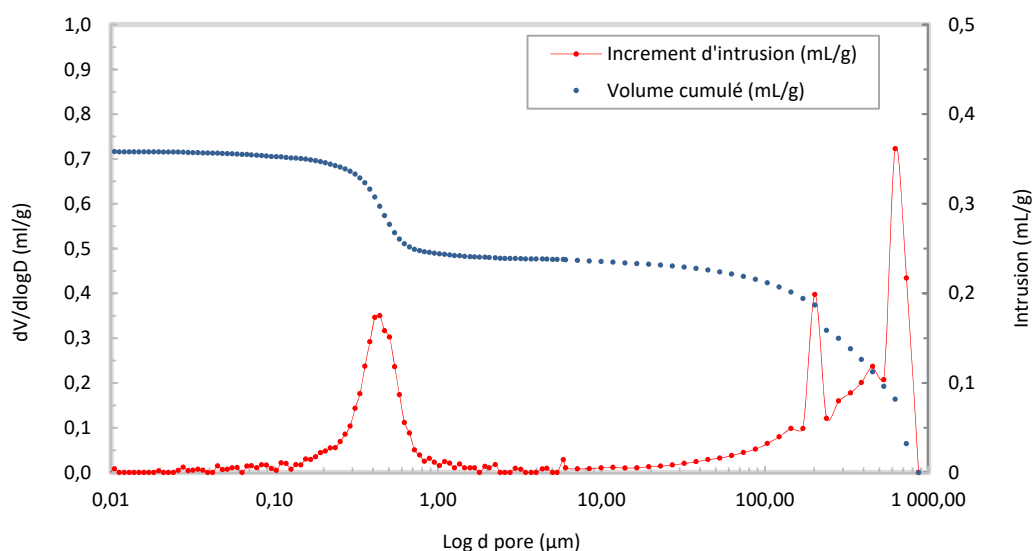


Figure 12- 29 Données de volume et différentiel de volume d'un échantillon marne (2,65-2,75 m-SC2).

12.6.3. Sable marneux

On observe que la gamme de taille de pores de grande taille est plus étalée que dans les échantillons de sol et de marne, entre 50 et 900 μm (fig. 12-30). Cette gamme de pores a la contribution la plus importante à la porosité de ce faciès. On observe un mode à 0,3 μm , très faible. Une différence remarquable est aussi la capacité volumique relativement élevée des échantillons sableux, avec une valeur moyenne d'environ 0,47 mL-Hg/g-ech.

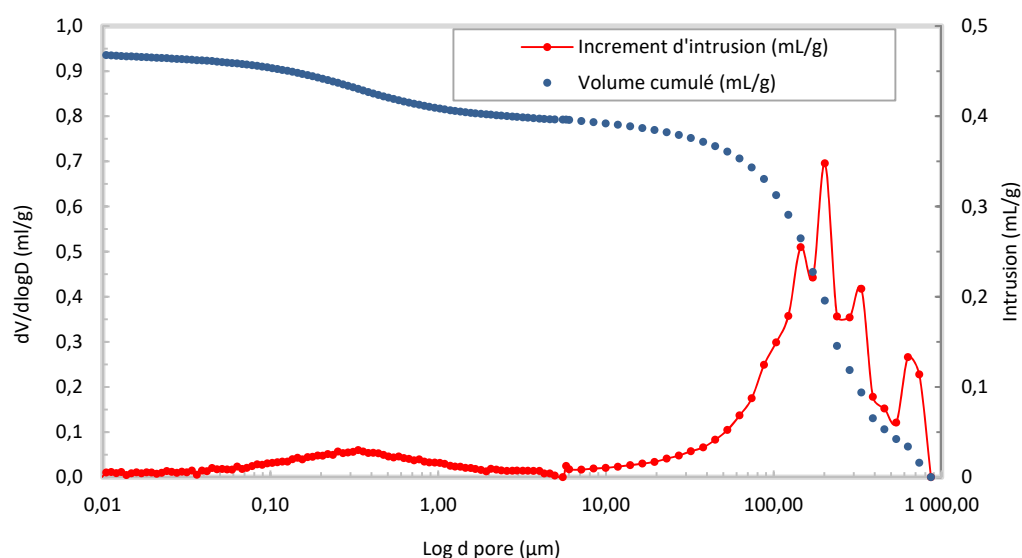


Figure 12- 30 Données de volume différentiel et différentiel-logarithmique d'un échantillon de sable (prof: 4-4,2 m-SC3)

12.6.4. Synthèse

Tous les faciès ont montré une distribution bimodale caractérisée par des pores entre 0,34 à 1,18 μm de diamètre de pore équivalent pour la gamme de taille la plus petite (tab. 12-14). La gamme de pores de plus grande taille est comprise entre 50 et 900 μm en moyenne. Les principales différences entre les trois courbes de distribution est observée dans la gamme de taille de pores $<1\mu\text{m}$. Les pores de plus petite taille sont observés dans la courbe de distribution de l'échantillon de sable mais avec un volume poral relativement faible par rapport à ceux observés pour les faciès de sol et marne. La marne possède la contribution la plus importante dans la gamme de petits pores (0,44 μm) ce qui est constaté par la courbe de volume cumulé où on observe une pente au point d'inflexion assez prononcée. En moindre proportion que la marne, le sol montre un volume poral relativement important, mais cette porosité est due à la présence des pores plus larges (1 μm) que ceux de la marne et du sable. Au niveau des macropores (50-900 μm), les échantillons de sol et de marne possèdent une gamme de pores très similaires. Le volume de macropores est plus important pour le faciès sableux (volume intergrains plus important). Les résultats de distribution de taille de pores sont cohérents avec les valeurs de porosité connectée présentées préalablement (tab. 12-11) pour les échantillons meubles de la ZNS, avec les sols ayant les faciès les plus poreux, suivis des sables et des marnes. Le reste des courbes de distribution de taille de pores sont présentées dans l'annexe 12-2.

Tableau 12- 14 Récapitulatifs de la distribution de taille de pores et d'intrusion totale de mercure.

Faciès	I.D	Mode dans la gamme de diamètre de pore < 2 µm (µm)	Mode dans la gamme de diamètre de pore > 2 µm (µm)		Intrusion totale (mL/g)
Sol	0,3-0,4 m-SC1	1,02	281	731	0,4261
	0-0,1 cm-SC2	1,36	388	739	0,488
	0,2-0,4 m-SC2	1,17	103	537	0,5618
	1,4-1,5 m-SC3	-	202	737	0,5725
MOY:		1,18	243	686	0,51
CV (%):		14,40	49	14	13,38
Marne	1,2-1,3 m-SC1	0,63	144	537	0,3643
	1,5-1,6 m-SC1	0,62	239	629	0,3521
	3,3-3,4 m-SC1	0,47	239	740	0,4069
	5,4-5,5 m-SC1	0,31	171	628	0,4271
	1,2-1,3 m-SC2	0,62	386	740	0,4779
	1,5-1,6 m-SC2	0,58	239	628	0,4865
	1,9-2 m-SC2	0,58	202	628	0,3335
	2,7-2,8 m-SC2	0,44	202	626	0,3583
	3,3-3,4 m-SC2	0,44	-	537	0,3362
	4,3-4,4 m-SC2	0,166	-	631	0,5763
	6,15-6,25 m-SC2	0,38	238	533	0,4673
	1,82-1,9 m-SC3	0,54	239	739	0,4049
	2,7-2,76 m-SC3	0,47	103	737	0,4194
	5,5-5,6 m-SC3	0,54	144	736	0,4309
	6,32-6,4 m-SC3	0,67	63	628	0,4943
MOY:		0,54	201	640	0,42
CV (%):		42,58	40	12	15,99
Sable marneux	4,2-4,3 m-SC1	0,47	122	536	0,6333
	5-5,1 m-SC1	0,38	171	735	0,3689
	5,9-5,97 m-SC1	-	122	743	0,4717
	3,9-4 m-SC2	0,155	239	627	0,6088
	4,8-5 m-SC2	0,41	122	738	0,5506
	5,3-5,4 m-SC2	0,47	63	627	0,5342
	2,58-2,6 m-SC3	0,51	145	535	0,3946
	4,2-4,25 m-SC3	0,36	145	631	0,4689
	5,1-5,15 m-SC3	0,33	77	631	0,5012
MOY:		0,39	134	645	0,50
CV (%):		28,95	39	12	17,66

12.7.Synthèse des propriétés physiques des matériaux de la ZNS

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de tous les résultats des propriétés physiques réalisées pour la caractérisation des matériaux de la ZNS. Les valeurs montrées sont les moyennes calculées en fonction de chaque faciès.

Tableau 12- 15 Récapitulatifs des propriétés physiques des matériaux de la ZNS. GRN : granulometrie, SS : surface specifique de grains, VBM : valeurs d'adsorption de bleu de méthylène, Φ_e : porosité connectée, Φ_T : porosité totale, ρ_s : masse volumique de particules solides, V_p : vitesse de propagation des ondes, DTP : distribution de taille de pores.

Facies		Variété	GRN				SS (m ² /g)	VBM (gBM/g)	Φ		ρ_s (g/cm ³)	V_p (m/s)	DTP (μ m)
			%A	%L	%S	%G			Φ_T	Φ_e			
Meuble	Sol	-	26	51	18	5	39,14	4,03	40,5	45,2	2,63	-	1 ;686
	Marne	Sableuse	10	25	37	28	11,44	0,2	39,3	36,97	2,68	-	0,5 ;640
		limoneuse	20	50	26	4	27,17	1,52	36,3	34,8		-	
	Intercalation (sable)	Grossier	7	16	57	20	6,6	0,9	41,1	39,6	2,67	-	0,4 ;645
		Limoneux	19	39	24	18	20,13		40	30,7		-	
Dure	Roche	Saine	-	-	-	-	-	-	13,6	12,1	-	3648	-
		Fissurée	-	-	-	-	-	-	14,4	12,6	-	3445	-
		Fractionnée	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Altérée	-	-	-	-	-	-	26,8	21,6	-	1901	-
		Dissoute	-	-	-	-	-	-	12,8	9,4	-	3947	-

CHAPITRE 13: ETUDE MINÉRALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES MATERIAUX DE LA ZNS

Les faciès minéralogiques des sols et des roches de l'aquifère des calcaires de Beauce sont très peu connus au niveau de la ZNS. La roche calcaire est le précurseur de minéraux secondaires qui sont apparus par altération physique et chimique. La présence de ces minéraux est une conséquence du transport et du passage de l'eau à travers la structure hydrogéologique.

13.1. Teneur en carbonate de calcium

Le tableau 13-1 récapitule les valeurs de teneurs en carbonates des faciès de la ZNS. La teneur en CaCO_3 des échantillons de sol est inférieure à 20 % avec une valeur moyenne de 14,6 % et un coefficient de variation CV de 32,6 %. Selon la norme NF P94-048 (AFNOR, 1996), sa classification appartient aux matériaux « peu calcaires ».

Tableau 13- 1 Tableau récapitulatif des mesures de teneur en carbonates.

Faciès	Numérotation (prof.)	% CaCO_3
Sol brun	0,70-0,80 cm-SC2	17,9
	1,4-1,5 m-SC3	11,2
		MOY : 14,6 CV : 32,6 %
Marne	1,2-1,3 m-SC1	84,1
	1,15-1,3 m-SC2	92,3
	1,9-2 m-SC2	93,3
	6,15-6,25 m-SC2	69,4
	1,82-1,9 m-SC3	96,6
	2,58-2,6 m-SC3	92,7
	2,9-3 m-SC3	99,0
	6,32-6,4 m-SC3	91,2
		MOY : 89,8 CV : 10,4 %
Sable marneux	3,3-3,4 m-SC1	97,5
	5,1-5,17 m-SC1	79,8
	5,7-5,8 m-SC1	98,1
	3,9-4 m-SC2	90,1
	4,7-4,74 m-SC2	92,1
	4-4,2 m-SC3	93,5
	5,1-5,2 m-SC3	89,8
		MOY : 92,7 CV : 6,6 %

Pour les échantillons marneux, les teneurs en CaCO_3 sont assez variables. La valeur plus faible est de 69,4 % (6,15-6,25 m-SC2). La valeur plus élevée est d'environ 99 % (échantillon 2,9-3 m-SC3). La valeur moyenne est de 89,8 % avec un CV de 10,4 %. Selon la classification établie par la norme, 6 échantillons sur 8 analysés sont calcaires ($\geq 90\%$), 1 échantillon sur 8 est fortement calcaire et 1 échantillon sur 8 est moyennement calcaire (30-69 %). Les échantillons sableux montrent des valeurs similaires à celles des marnes, mais avec une dispersion des valeurs moins élevée. La valeur plus faible est de 79,8 % et la valeur plus élevée de 98,1%. La moyenne est de 92,7 % avec un CV de 6,6 %. Cinq échantillons sur 7 sont calcaires et 2 échantillons sur 7 sont fortement calcaires.

13.2. Teneur en carbone organique des matériaux

L'analyse de la teneur en matière organique a montré de faibles valeurs pour les faciès étudiés (tabl. 13-2). Les valeurs plus élevées correspondent au sol avec une moyenne de 0,58 %. La valeur de TOC pour les autres faciès est quasiment nulle.

Tableau 13-2 Résultats de teneur en carbone organique (TOC) mesurée à l'aide du dispositif RockEval

Faciès	I.D	TOC(%)
Sol brun	40-50 cm-SC1	0,9
	70-80 cm-SC2	0,42
	1,5-1,6 m-SC3	0,43
	MOY:	0,58
	CV (%):	38,39
Marne	2,65-2,75 m-SC2	0,04
	4,42-4,6 m-SC2	0,05
	6,15-6,25 m-SC2	0,14
	MOY:	0,08
	CV (%):	71,84
Sable	1,9-2 m SC2	0,06
	1,82-1,9 m-SC3	0,11
	MOY:	0,09
	CV (%):	41,59
Roche	16,1-16,2 m-SC2	0,03

La présence de matière organique peut augmenter la surface spécifique des matériaux. C'est peut être le cas pour les échantillons de sols qui possèdent les valeurs plus élevés de surface spécifique.

13.3. Minéralogie des faciès de la ZNS

13.3.1. Sol et roches meubles

13.3.1.1 Diffractogramme des échantillons en poudre (fraction < 50 µm)

Les diffractogrammes de la fraction <50 µm obtenus pour les échantillons meubles de la ZNS sont quasiment tous identiques. Les résultats correspondant à deux échantillons meubles sont présentés dans la figure 13-1. On observe la présence principalement de la calcite et du quartz avec un pic caractéristique de plus haute intensité vers 34,28 ° 2θ (3,04 Å) et 31,035 ° 2θ (3,34 Å), respectivement (Robert, 1975).

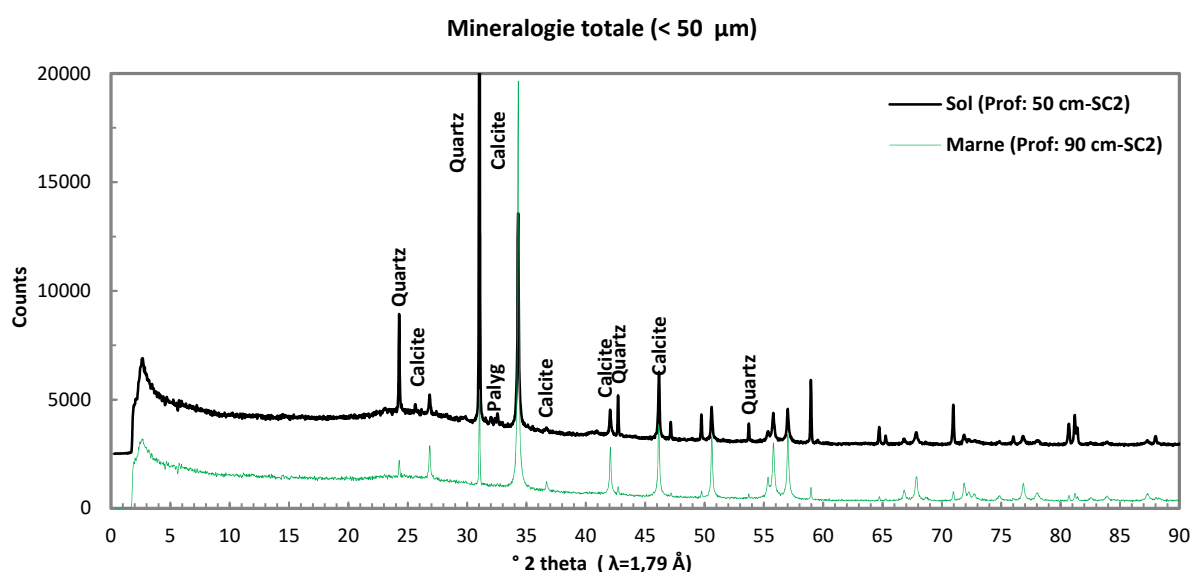


Figure 13- 1 Diffraction des échantillons meubles de la ZNS.

13.3.1.2 Diffractogramme des échantillons sur lames orientées (fraction < 5µm)

Après la décarbonatation et l'extraction de la fraction <5 µm, les résultats de DRX de trois échantillons représentatifs des faciès meubles sont présentés dans la figure 13-2.

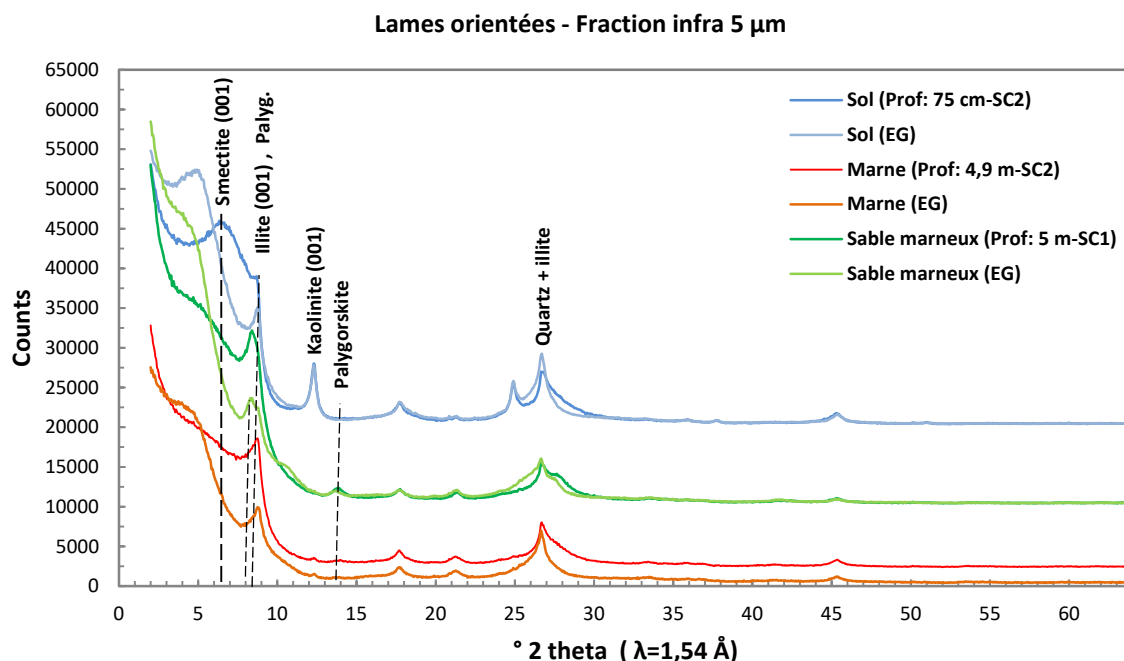


Figure 13- 2 Diffraction des échantillons en après décarbonatation en lame orientée (LO).

Quatre types d'argiles ont été observés dans le diffractogramme de la figure 13-2. Le sol possède une quantité relativement élevée de smectite par rapport aux autres échantillons. Le pic caractéristique se trouve vers $6,2^{\circ} 2\theta$ (d_{001} : $14,24 \text{ \AA}$). Après le traitement à l'EG, l'harmonique 001 (et toute la série $00l$) a été décalée vers des valeurs $^{\circ}2\theta$ plus faibles ($5^{\circ}2\theta$), ce qui correspond à une expansion de l'espace interfoliaire à $17,6 \text{ \AA}$. Le même comportement est observé pour les échantillons de marne et sable. La kaolinite est aussi présente dans l'échantillon de sol avec le pic 001 plus intense vers $12,3^{\circ} 2\theta$ ($7,17 \text{ \AA}$). Elle est présente aussi dans l'échantillon de marne, mais dans une faible proportion. Après saturation à l'EG, le pic de la kaolinite garde sa position, ce qui permet de valider sa présence. L'illite est présente dans les trois faciès dans une proportion plus ou moins importante. Les harmoniques $00L$ ne sont pas affectés par la glycolation. Le pic 001 de plus haute intensité se trouve vers $8,83^{\circ} 2\theta$ ($10 \text{ \AA}$). Le quartz, étant le minéral le plus abondant après la calcite, est aussi détecté dans la fraction $< 5 \mu\text{m}$.

La palygorskite est présente dans le faciès de sable, mais absente dans le sol et la marne. C'est un minéral trouvé souvent dans les environnements sédimentaires marins ayant de valeurs de pH alcalines et une teneur en silice importante. De tels environnements sont typiques dans les formations calcaires et dolomitiques, en absence de transport clastique (Isphording, 1973). Son pic caractéristique se trouve vers $8,496^{\circ} 2\theta$ ($10,4 \text{ \AA}$),

presque superposé avec celui de l'illite. Ce minéral n'est pas affecté par l'EG (Robert, 1975).

13.3.2. Roche calcaire

13.3.2.1 Diffractogramme des échantillons en poudre (fraction < 50µm)

Les deux minéraux principaux de la roche calcaire toujours présents sont la calcite et le quartz. La calcite a été repérée grâce à la présence du pic caractéristique à $34,28^\circ 2\theta$ ($3,04 \text{ \AA}$) avec la plus grande intensité (fig. 13-3). Le pic caractéristique du quartz est observé vers $31,035^\circ 2\theta$ ($3,34 \text{ \AA}$).

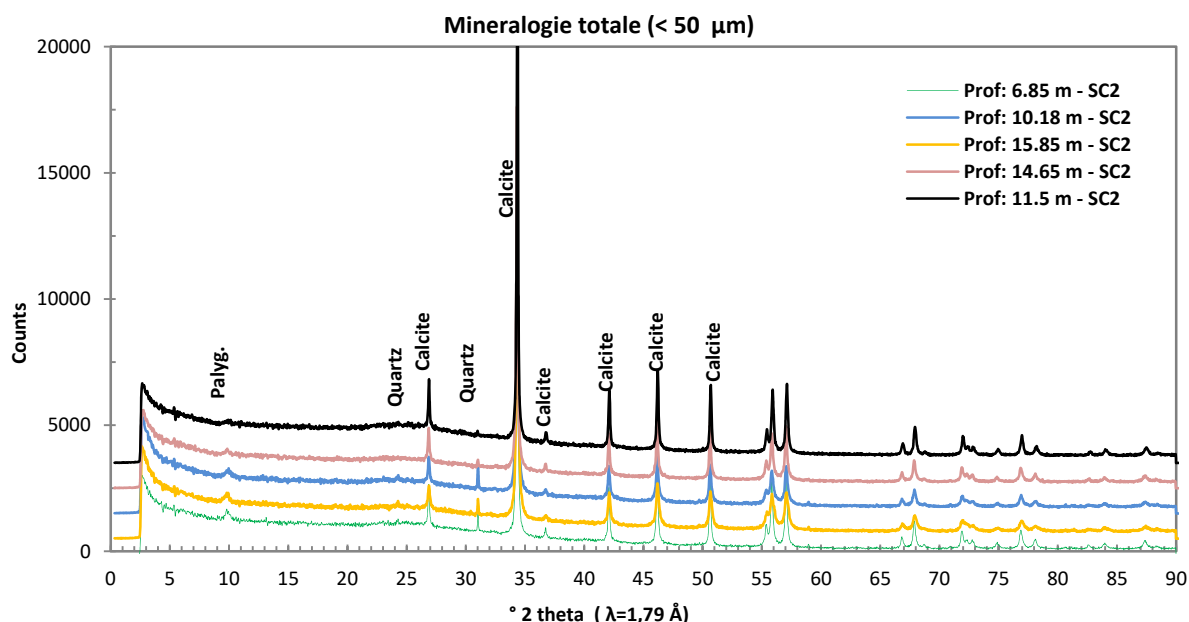


Figure 13- 3 Diffraction des échantillons en poudre de la ZNS.

Parmi les minéraux secondaires trouvés dans le faciès de roche, on observe assez souvent la palygorskite et la goethite. Dans la figure 13-3, quatre échantillons possèdent des quantités relativement faibles de palygorskite. Le pic caractéristique se trouve vers $9,93^\circ 2\theta$ ($10,34 \text{ \AA}$).

Les trois diffractogrammes présentés dans la figure 13-5 appartiennent aux mêmes échantillons présentés dans la figure 13-3 après décarbonatation (6,85 m-SC2, 14,65 m - SC2 et 11,5 m-SC2). La figure 13-4 présente l'endroit de prélèvement de chaque échantillon.



Figure 13- 4 a) Fracture avec précipitation des oxydes à 6,85 m -SC2, b) Fracture à 11,5 m-SC2, c) roche avec des vacuoles et débris grossiers à fins à 14,65 m-SC2.

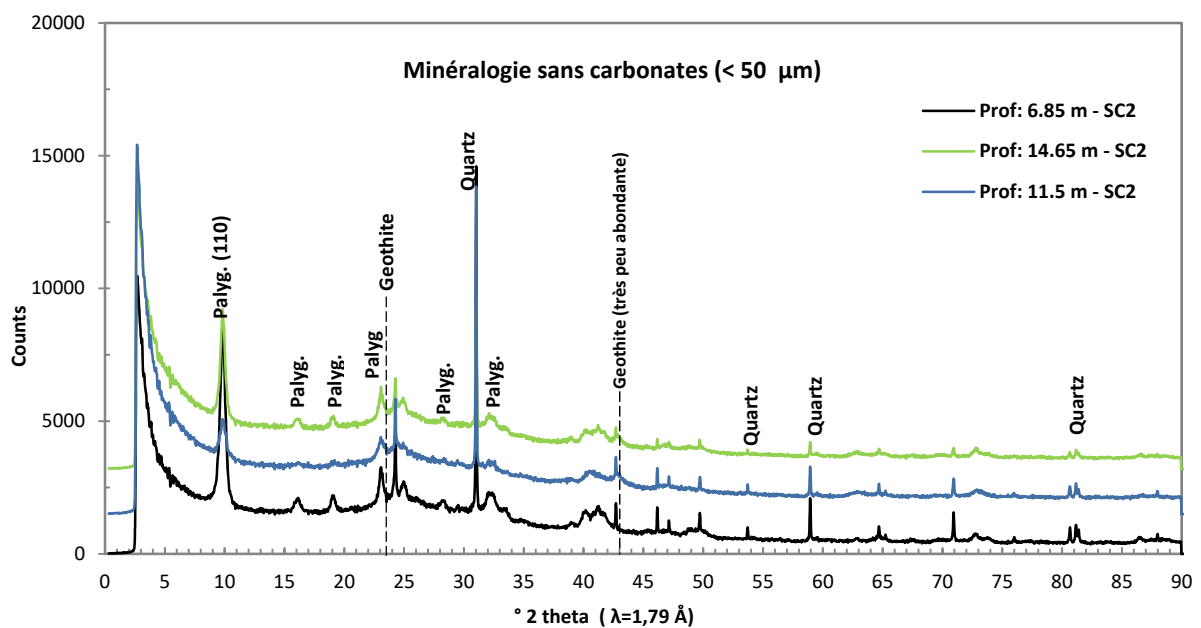


Figure 13- 5 Diffraction de la fraction < 50 µm après décarbonatation.

En l'absence de calcite, on observe que la palygorskite est le minéral secondaire trouvé en proportion majoritaire dans la roche calcaire, avec un pic caractéristique à $9,93^\circ 2\theta$ ($10,34 \text{ \AA}$) ainsi que la série de pics trouvés à $16,22 - 19,41 - 23,09^\circ 2\theta$ ($\lambda=1,79 \text{ \AA}$ - Co K α).

Les oxydes ne sont pas détectés pendant l'analyse de la poudre à cause de la forte intensité de la calcite. Ils ont été mieux observés après la décarbonatation des échantillons. La goethite est présente, mais avec une très faible proportion, caractérisée par l'apparition de deux pics vers $24,7^\circ 2\theta$ et $42,83^\circ 2\theta$ pour les échantillons 11,5 m-SC2 et 14,65 m-SC2, qui correspondent aux zones de fractures. Le pic vers $42,83^\circ 2\theta$ est presque superposé avec le pic à $42,701^\circ 2\theta$ qui correspond au quartz, d'où la difficulté de repérer cet oxyde de fer (fig. 13-5). Son apparition a été constatée souvent dans les endroits fracturés où il existe des couches d'oxydation de l'ordre de quelques microns d'épaisseur, qui ont précipité sur les parois de la roche calcaire exposée.

13.3.2.2 Diagrammes de diffraction des rayons X sur lames orientées (fraction < 5 μm)

Un autre groupe de minéraux secondaires a été repéré dans la minéralogie de la roche calcaire après décarbonatation et extraction de la fraction infra <5 μm . Les diffractogrammes de la figure 13-8 correspondent à l'analyse minéralogique de lames orientées de deux échantillons qui ont été classés comme « altérés » d'après l'analyse visuelle (fig. 13-6 et 13-7).

Selon les diffractogrammes présentés dans la figure 13-8, on observe une bosse vers $6,2^\circ 2\theta$ avant la saturation à l'éthylène glycol pour l'échantillon 7,7 m-SC1, ce qui correspond à une valeur d_{001} d'environ 14,24 Å selon la loi de Bragg. Ce signal n'est pas flagrant pour l'échantillon 7,36 m-SC2. Cette valeur d'espace interfoliaire est caractéristique d'une argile de type smectite. Après la saturation à l'EG, les deux échantillons ont un décalage du pic vers des valeurs $^\circ 2\theta$ plus faibles ($5^\circ 2\theta$) ce qui correspond à une expansion de l'espace interfoliaire à 17,6 Å. Ce comportement est typique d'une argile gonflante de type Na-montmorillonite (Robert, 1975).



Figure 13- 6 Echantillonnage pour la diffractométrie X sur lame orientée (7,68-7,74 m-SC1).



Figure 13- 7 Échantillonnage pour la diffractométrie X sur lame orientée (7,28-7,44 m-SC2).

Le pic caractéristique de la palygorskite en lame orientée (longueur d'onde correspondant à une source de cuivre $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ - Cu K α) se trouve vers $8,5^\circ 2\theta$ ($10,4 \text{ \AA}$). La position de pics hkl de la palygorskite est curieusement décalée légèrement vers la

gauche après le traitement à l'EG, bien que la palygorskite ne soit pas un minéral gonflant (fig. 13-8).

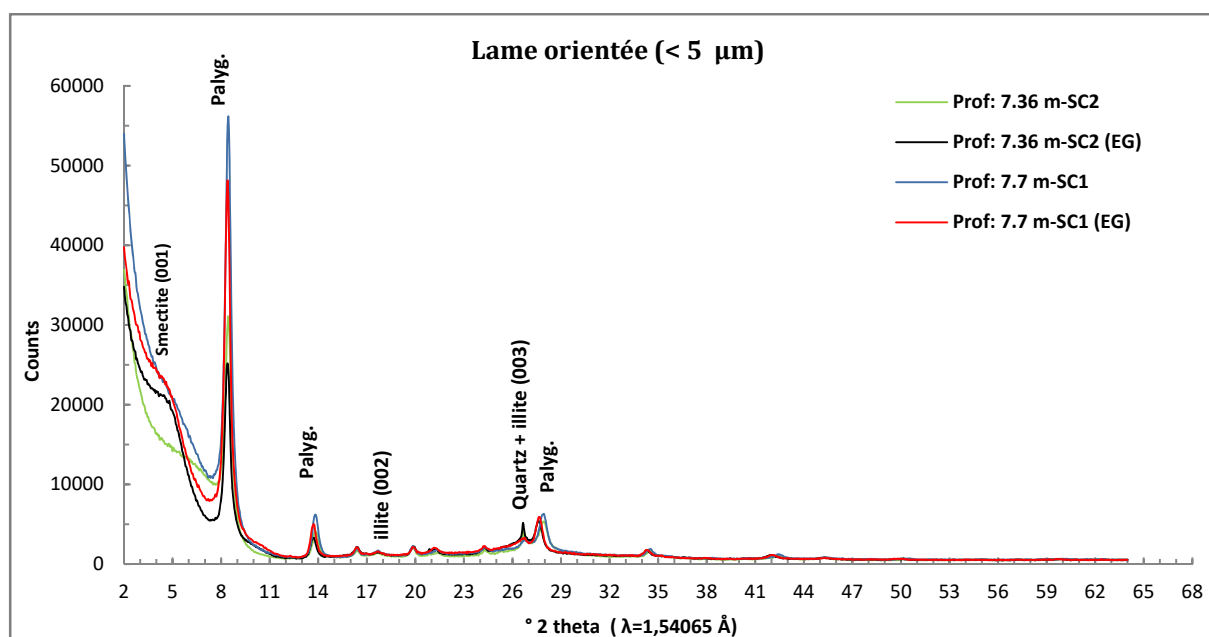


Figure 13- 8 Diffraction des lames orientées après décarbonatation et extraction de la fraction <5 μm.

L'illite est aussi présente dans l'ensemble de minéraux argileux. Le pic caractéristique se trouve vers 8,84 °2θ (10 Å), mais il est superposé avec le pic d'intensité majeure de la palygorskite (8,5 °2θ). Les pics (harmoniques) 002 et 003 de l'illite sont présents vers 17,7 °2θ (5 Å) et 26,75 °2θ (3,3 Å). L'harmonique 003 est superposée avec le pic du quartz (fig. 13-8).

L'analyse minéralogique de la fraction < 5 μm des échantillons prélevés dans une fracture du SC2 entre 11,5 et 11,8 m (fig. 13-4-b) a montré également la présence de kaolinite dans une proportion faible (fig. 13-9). Le pic caractéristique correspondant à l'harmonique 001 se trouve à environ 12,5 °2θ ce qui correspond bien à la valeur $d_{001} = 7 \text{ Å}$. Pour valider la présence de l'illite et de la kaolinite dans la phase argileuse, les lames orientées après chauffage à 500 °C ont été analysées (fig. 13-9). Après le chauffage à 500° C, la structure cristalline de la palygorskite s'est effondrée et le pic 001 de l'illite apparaît vers 8,8 °2θ étant donné que son réseau cristallin n'est pas altéré, sinon à partir de 700° C. Par contre, la kaolinite est affectée par des températures au-delà de 300 °C et donc le pic 001 disparaît. Ce dernier traitement valide la présence de ces deux minéraux argileux dans les zones de fractures naturelles.

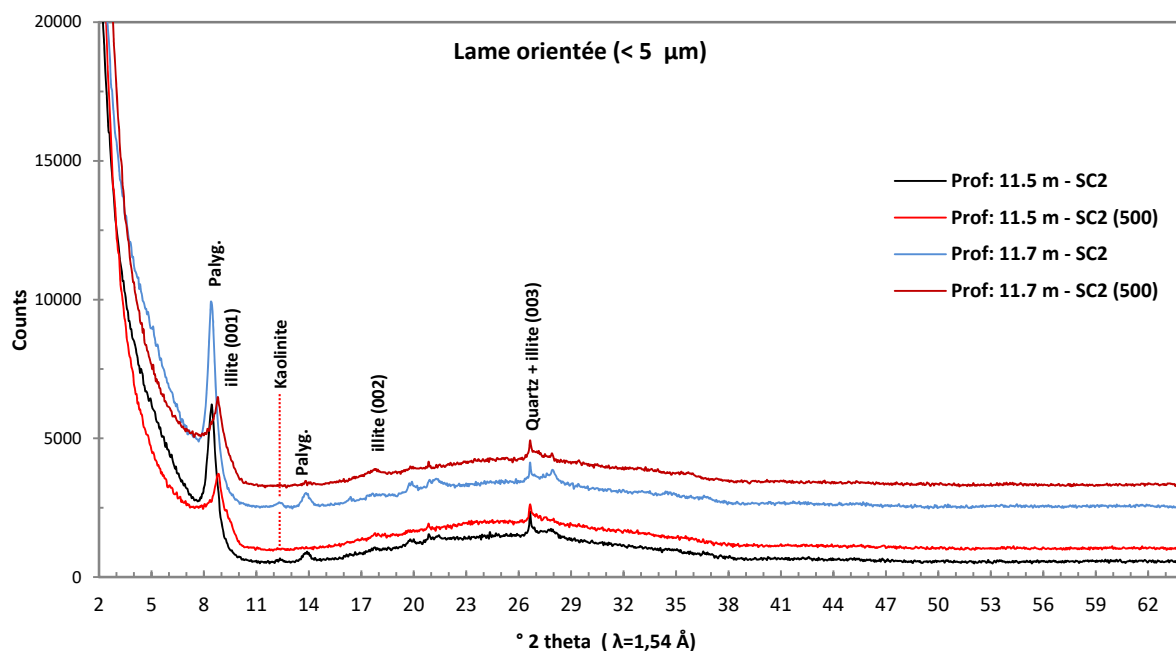


Figure 13- 9 Diffraction des lames orientées avant et après chauffage à 500° C.

13.4. Pétrographie des faciès de roche calcaire

Les roches calcaires de la ZNS de l'aquifère possède souvent des fractures ou fissures, qui rendent difficile l'étude de ses propriétés hydriques. Il existe aussi dans la roche un réseau de microfissures, parfois imperceptibles à l'œil nu, qui peuvent aussi jouer un rôle dans les mécanismes de transport des eaux souterraines, mais qui est très peu connu. En raison de cette difficulté, il est utile de chercher des analyses alternatives pour caractériser ces mécanismes de stockage et de transport de l'eau par le faciès calcaire dur. Une première approche est faite à travers des techniques d'imagerie, telle que la pétrographie à l'aide du microscope optique. Les échantillons fracturés et altérés ont été privilégiés pour cette observation.

La matrice de la roche est observée sous microscope optique en lumière polarisée analysée dans la figure 13-10. Dans une première observation, on peut remarquer une matrice riche en carbonates.

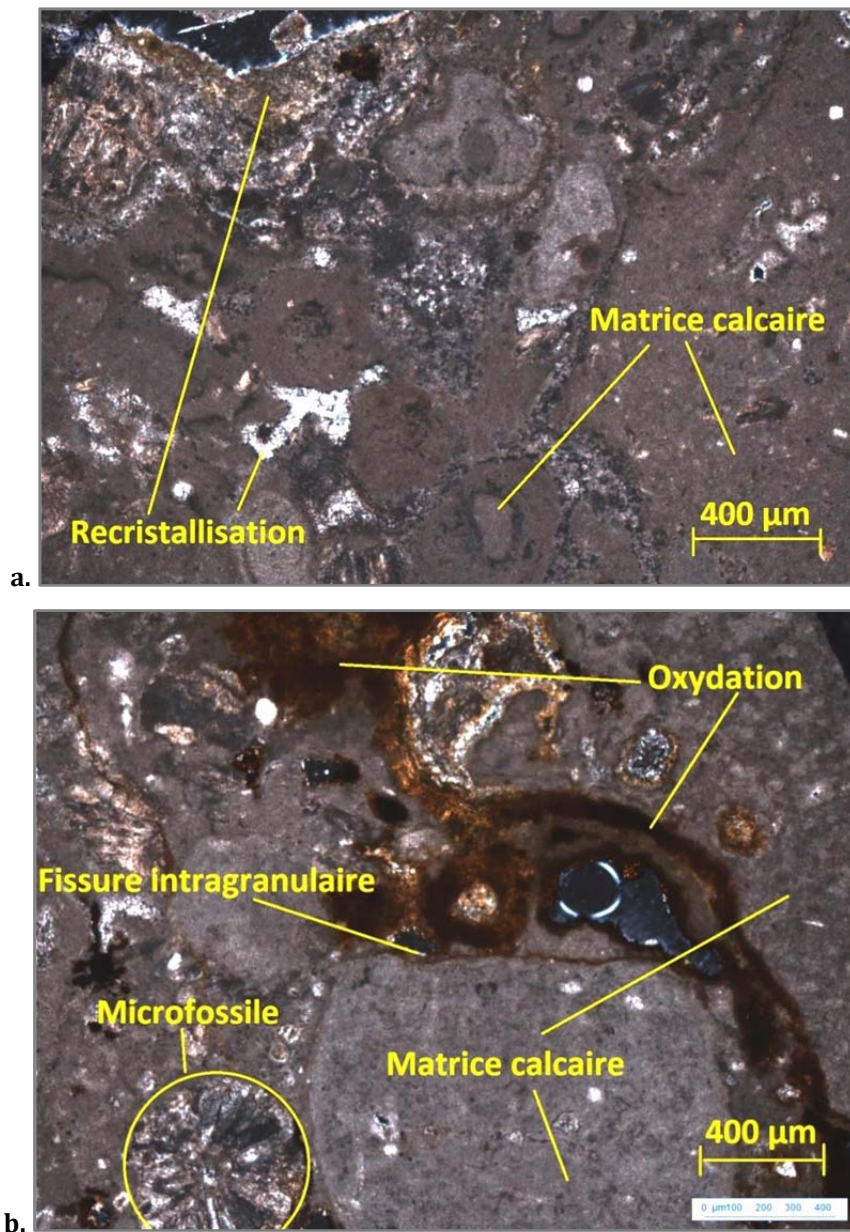


Figure 13- 10 Matrice calcaire et éléments stratigraphiques présents dans les faciès de roche dure (11-11,1 m-SC2). Analyse en lumière polarisée analysée (LPA).

La texture de la matrice est micritique, parfois avec des indices de précipitation de calcite dans les cavités (fig. 13-10-a) et des fissures intra-granulaires (fig. 13-10-b). Des microfossiles caractéristiques du Miocène inférieur (Aquitaniens) sont observés, comme par exemple des foraminifères (fig. 13-10-b) et, moins souvent, des radiolaires.

Parmi les minéraux secondaires détectés sous microscope, on trouve souvent des oxydes principalement dans les fissures (fig. 13-11-a) ou dans les fractures (fig. 13-11-b). Les deux échantillons montrés dans la figure 13-11 sont situés entre 11 et 11,7 m de

profondeur. La nature des oxydes reste difficile à déterminer par simple inspection au microscope optique.

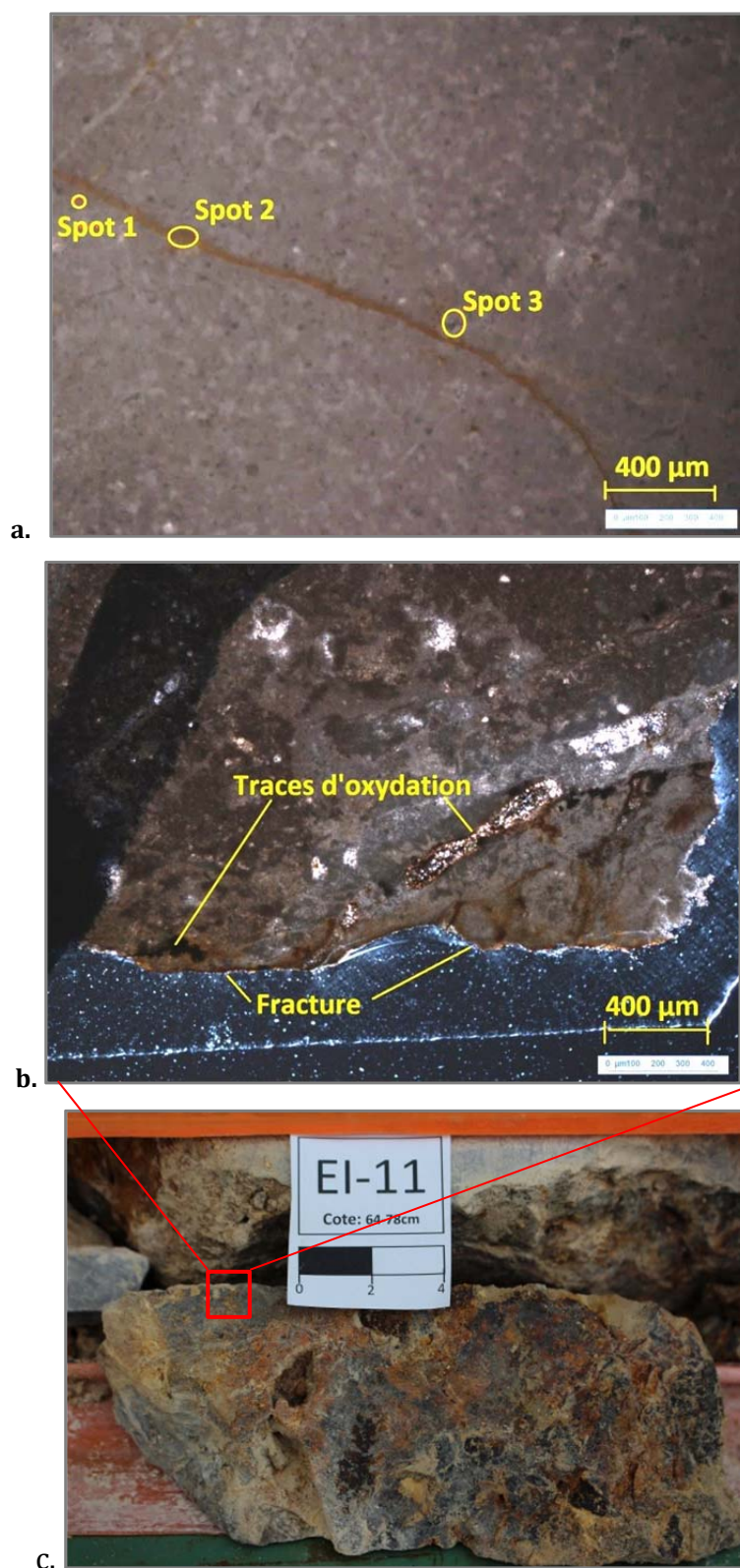


Figure 13- 11 a) Microfissure avec traces d'oxydation (prof : 11 m – SC2) lumière polarisée analysée (LPA), b) profil de fracture avec précipitations d'oxydes (11,64-11,78 m-SC2), c) zone de prélèvement sur la roche fracturée à 11,7 m-SC2.

Dans certains cas, on a constaté la présence de vacuoles ou cavités liées à la dissolution de la matrice carbonatée par l'action de l'eau (fig. 13-12). La précipitation d'oxydes et la recristallisation de calcite sont souvent observées autour des vacuoles (fig. 13-12-b). Les cavités observées dans la plupart des échantillons (lames minces) présentent un diamètre variant de quelques microns à plusieurs millimètres.

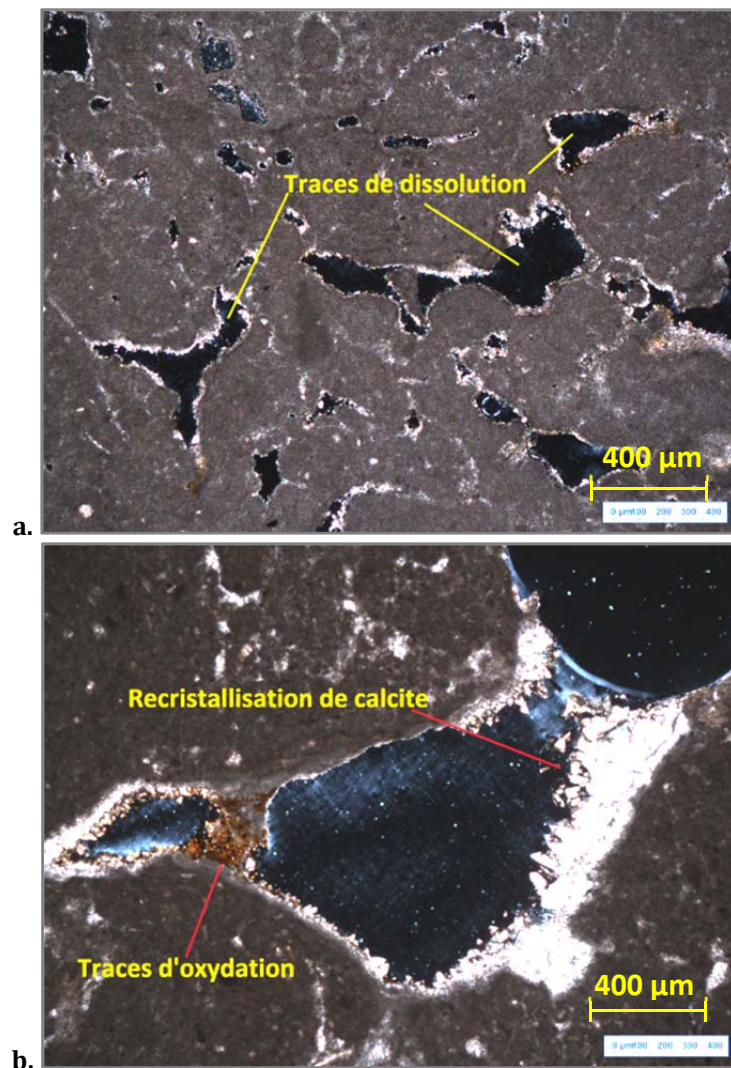


Figure 13- 12 a) Cavités vacuolaires dans la matrice calcaire (prof: 14,5 m – SC2), b) recristallisation et oxydation dans une vacuole de dissolution (prof : 13,25 m – SC2)

Le remplacement après de la matrice calcaire a été observée également dans certains échantillons. Le remplacement de la matrice carbonatée est caractérisé par le changement de texture et de couleur. La couleur grisâtre de la matrice n'est plus observée. En revanche, elle devient opaque. La figure 13-13 présente plusieurs zones d'altération avec remplacement par d'autres groupes de minéraux qui ne peuvent être distingués avec le microscope optique.

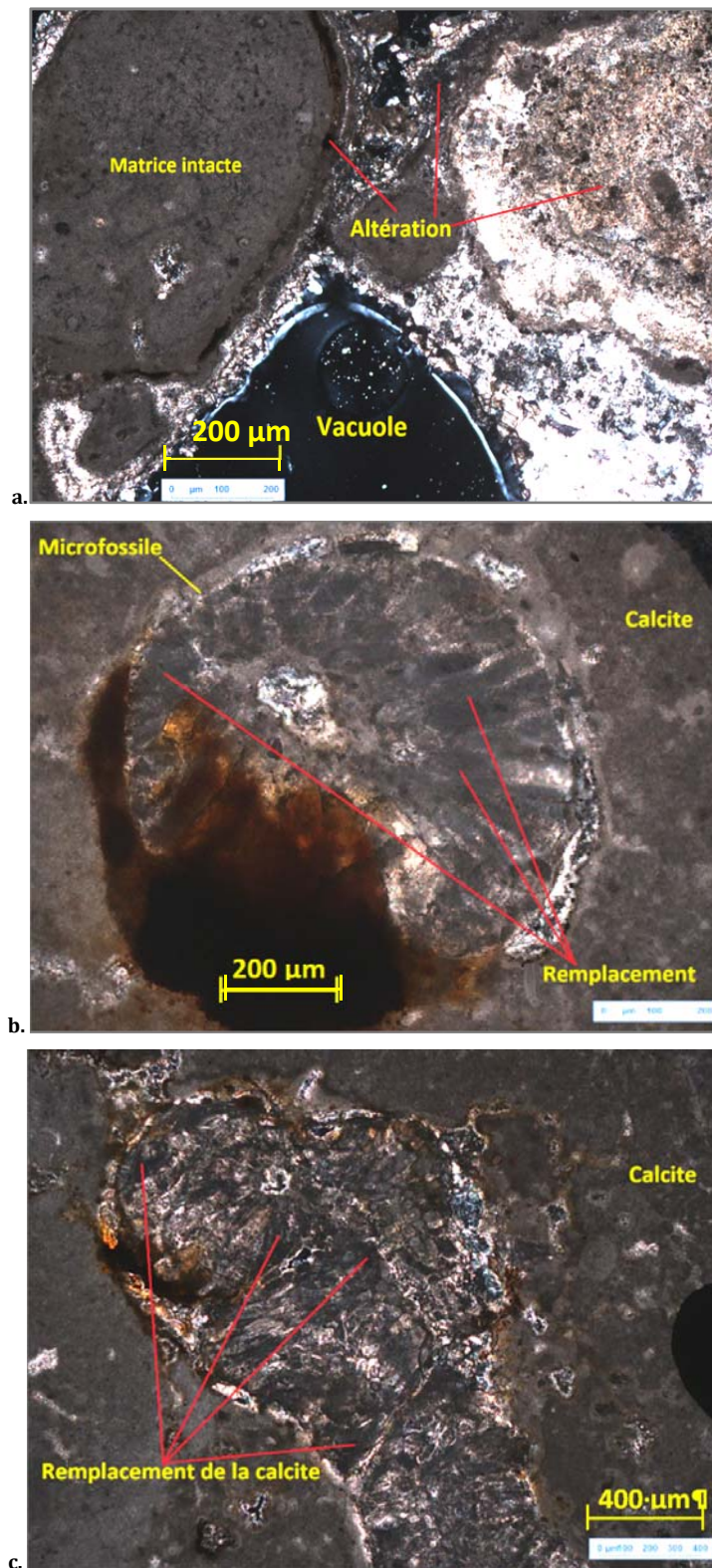


Figure 13- 13 a) Remplacement de la matrice calcaire et précipitation de minéraux secondaires, b) Altération de la calcite à partir d'un foraminifère, c) Inclusion fossile et remplacement de la matrice calcaire (prof : 11 m –SC2).

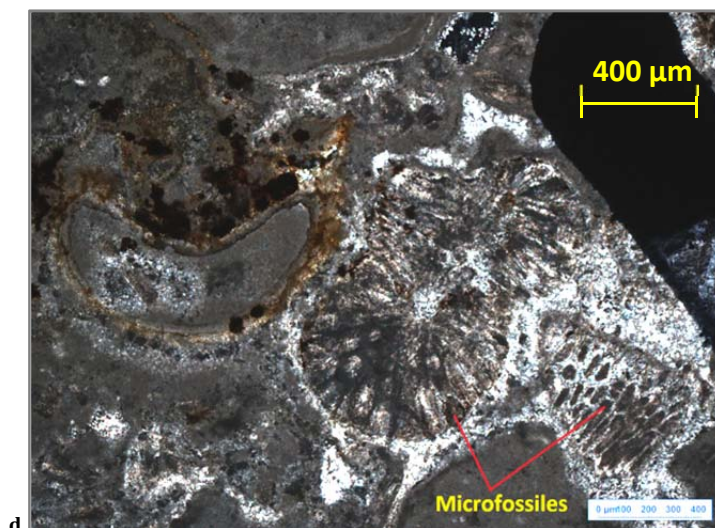


Figure 13- 13 (suite) : d) Précipitation de minéraux secondaires dans la matrice à partir de foraminifères et radiolaires (prof : 11 m – SC2).

La plupart des remplacements et altérations de la calcite ont été observées dans les joints intragranulaires et dans les microfossiles présents dans la roche. Il est possible que le remplacement soit fait par des phyllosilicates, vu la taille des particules. Par exemple, la présence de microfossiles de type radiolaires (fig. 13-13-d à droite) peut représenter la source de silice nécessaire pour la formation de phyllosilicates.

La nature précise des minéraux secondaires précipités à partir de la roche mère a été caractérisée à l'aide du MEB à travers l'étude de la géochimie des espèces minérales.

13.5. Analyse chimique et microstructure des faciès de roche dure de la ZNS

13.5.1. Matrice calcaire

Une matrice carbonatée micritique a été observée au microscope électronique. Son principal composant est la calcite. L'analyse chimique de celle-ci a montré également la présence de magnésium et d'impuretés tels que Si, Al et Fe (tab. 13-3). Ces résultats sont cohérents avec ceux de la diffractométrie X (§13.3.2), qui ont révélé la présence de palygorskite (minéral magnésien) et de phyllosilicates (illite, smectites).

Le tableau 13-3 présente le résultat de l'analyse obtenue à l'aide du détecteur EDS ciblé sur une zone saine de la matrice calcaire de l'échantillon 11-11,1 m-SC2 préparé en lame mince (fig. 13-10). Les données stœchiométriques normalisées (colonne G du tableau

13-3) sont utilisées pour les calculs de la formule chimique du minéral trouvé sur le point cible.

Tableau 13- 3 Analyse chimique exprimée en oxydes sur les zones d'altération de la matrice calcaire (prof : 11-11,1 m -SC2).

Elément	(A) Numéro Atomique	(B) Masse [%]	(C) Masse Norm. [%]	(D) Atom [%]	(E) Oxyde	(F) Sto. [%]	(G) Sto. Norm. [%]	(H) Erreur absolue [%]
Calcium	20	53,94	70,51	49,08	CaO	75,47	98,66	1,63
Magnésium	12	0,62	0,801	0,92	MgO	1,02	1,34	0,06
Oxygène	8	21,94	28,68	50	O2	0	0	2,51

Parmi les espèces minéralogiques différentes de la calcite, on trouve assez souvent le quartz (fig. 13-14), des cristaux de feldspaths (fig. 13-15) beaucoup moins observés, des oxydes de titane, des oxydes de manganèse et des phosphates.

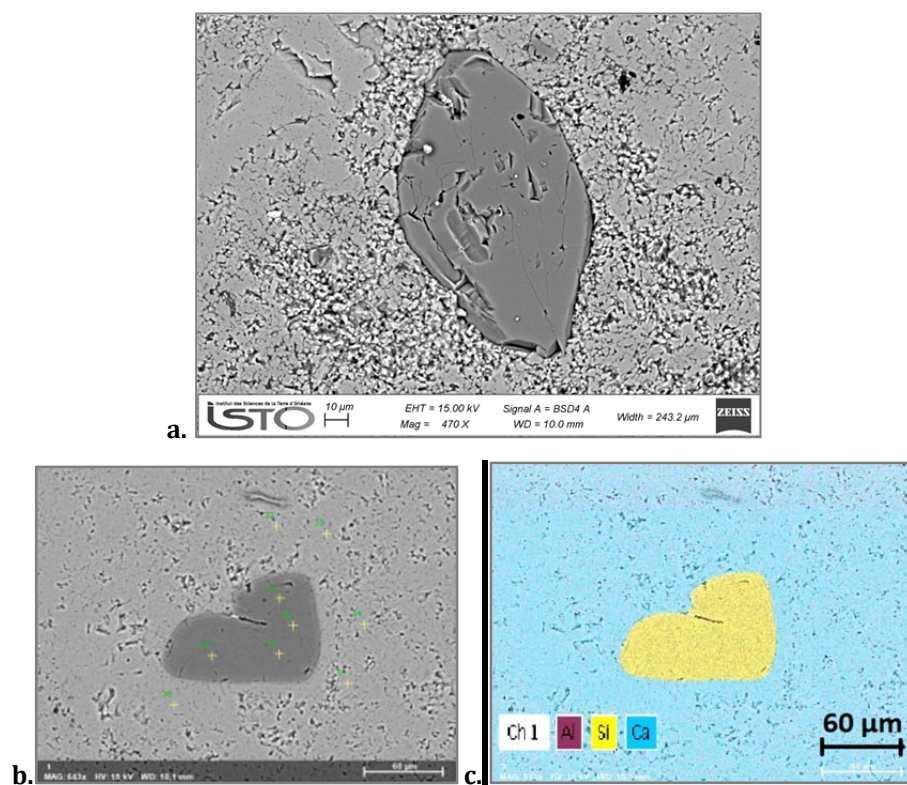


Figure 13- 14 a-b) Inclusion d'un cristal de quartz dans la matrice calcaire saine (EDS: électrons en rétrodiffusion), c) cartographie des espèces chimiques présente dans la matrice calcaire saine. (prof. : 11 m -SC2).

Sur l'image 13-14-c (matrice saine) et 13-15-b (matrice altérée), on peut observer en bleu la présence de la calcite presque pure.

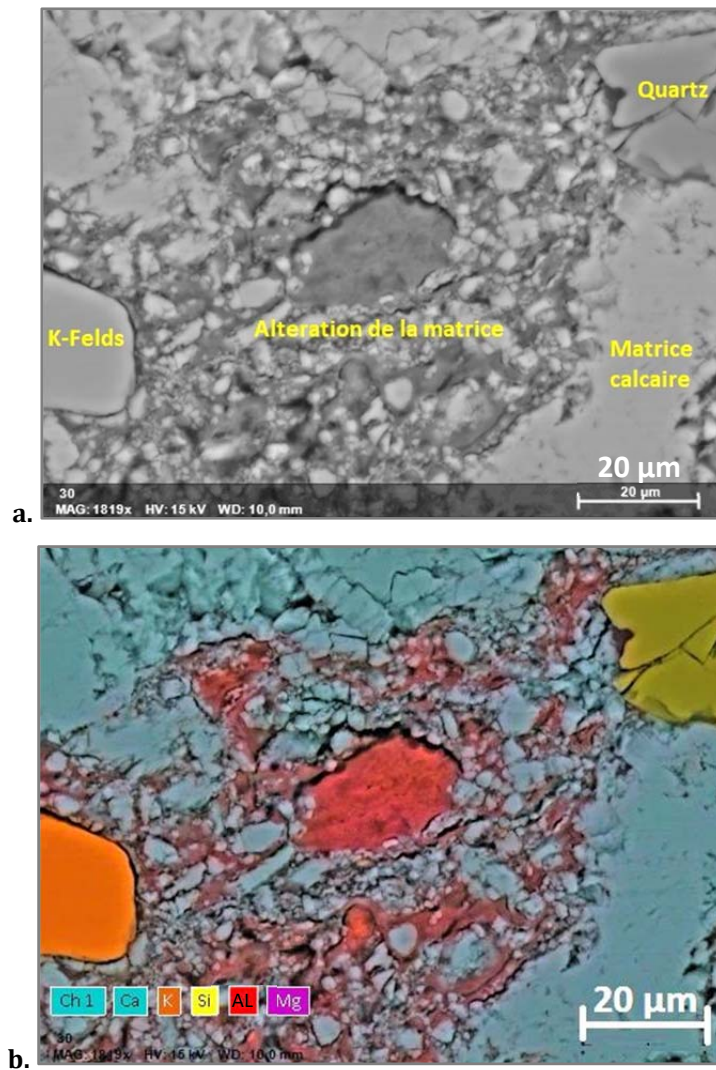


Figure 13- 15 a) Image en EDS de la matrice calcaire altérée avec la présence de quartz et feldspath potassique, b) cartographie des espèces chimiques présente dans la matrice calcaire altérée (prof.: 11 m -SC2).

13.5.2. Microstructure et topographie structurale

On a observé également la topographie structurale de la roche à l'aide du détecteur d'électrons secondaires (SE). Les images suivantes ont été obtenues sur les faciès de roche dure:

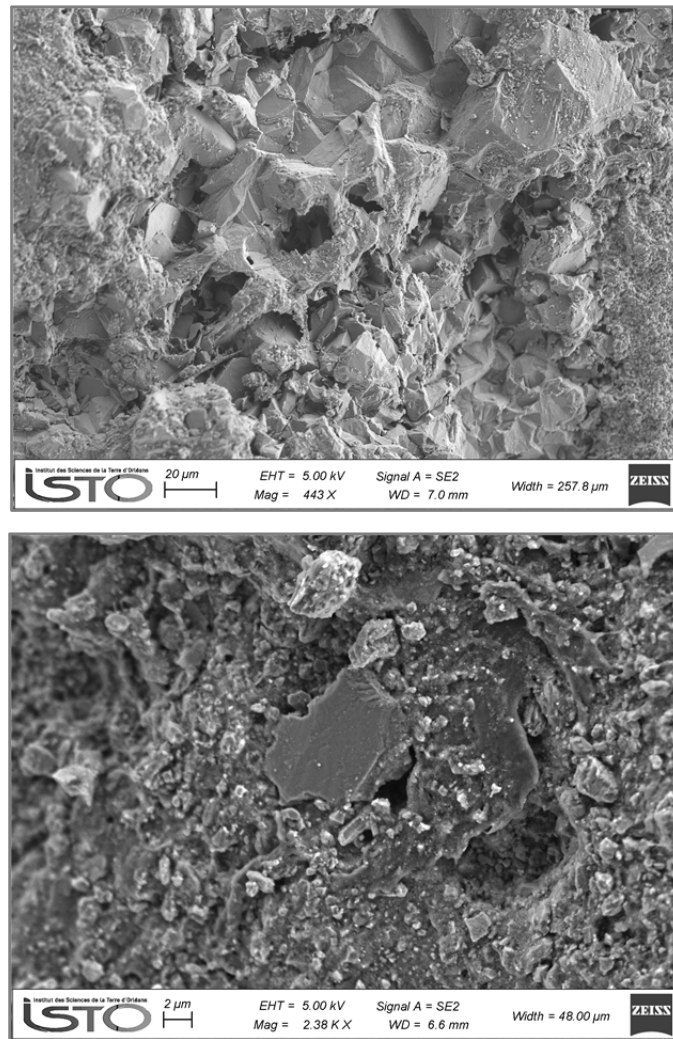


Figure 13- 16 Topographie d'un échantillon sain observée à l'aide des électrons secondaires. (prof. : 9,75 m -SC2).

Sur la figure 13-16, on observe une géométrie bien définie de cristaux de calcite. Très peu de cavités (porosité) sont observées sur les surfaces. Dans la figure 13-17, on observe une topographie de surface où la calcite a été transformée. En haut de la figure 13-17-a, on observe une topographie où les cristaux de calcite ont évolué et des cavités ont été créées. A cette échelle, on peut observer des pores de taille inférieure au micron jusqu'à plusieurs microns. On observe sur la figure 13-17-b le remplissage des pores par des minéraux secondaires apparemment argilo-fibreux.

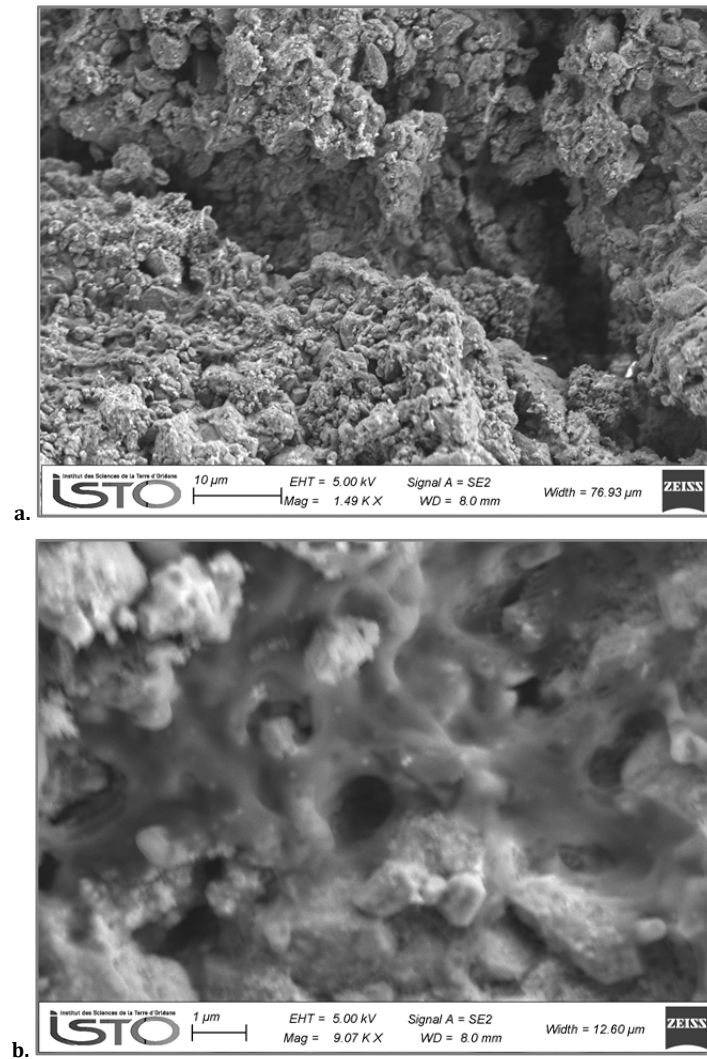


Figure 13- 17 a) Porosité de la roche calcaire altérée, b) présence de minéraux fibreux dans l'espace poral (prof : 7,7 m -SC2).

Un autre échantillon visuellement altéré a montré lui aussi des textures assez particulières, caractérisées par la présence de dépôts en couches qui semblent remplacer les grains de calcite (fig. 13-18-a et -b).

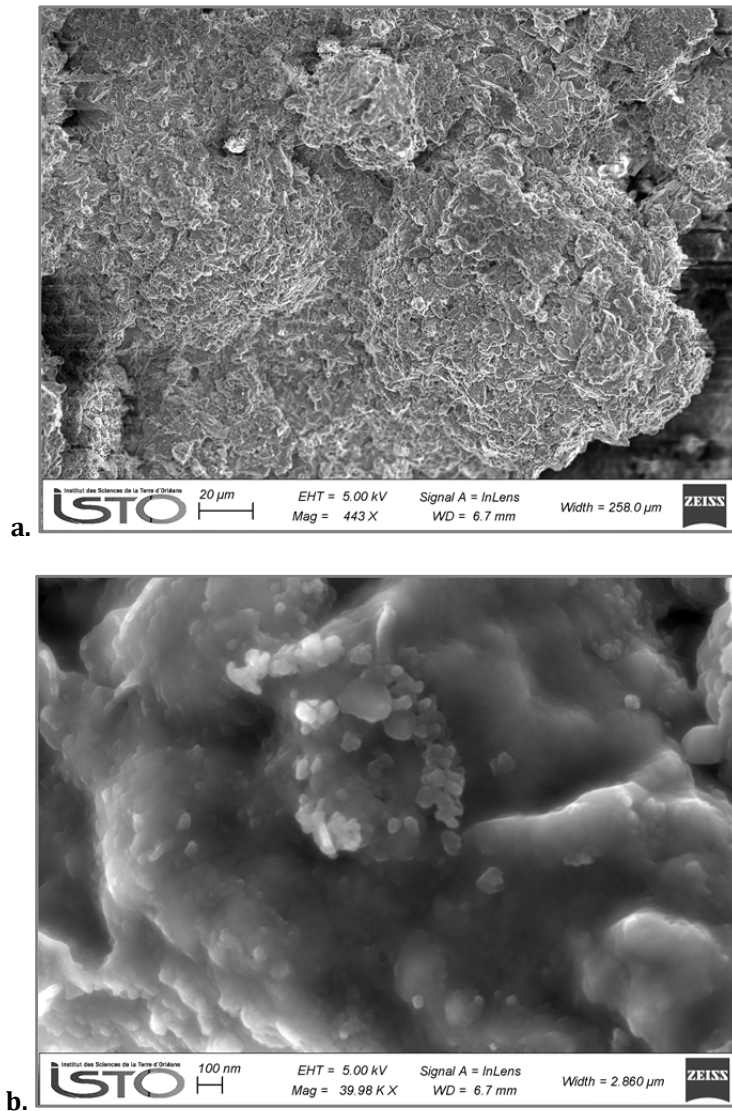


Figure 13- 18 a) Dépôts de minéraux secondaires, b) grains de calcite couverts par de particules argileuses (prof : 5,15 m -SC2).

Un quatrième échantillon a été étudié. C'est un échantillon de roche fracturée (fig. 13-19). Sur l'image, on observe des endroits de haute luminosité (flèches) qui correspondent à des zones avec des minéraux lourds probablement des oxydes de fer. Aucune précipitation de particules fibreuses n'est observée.

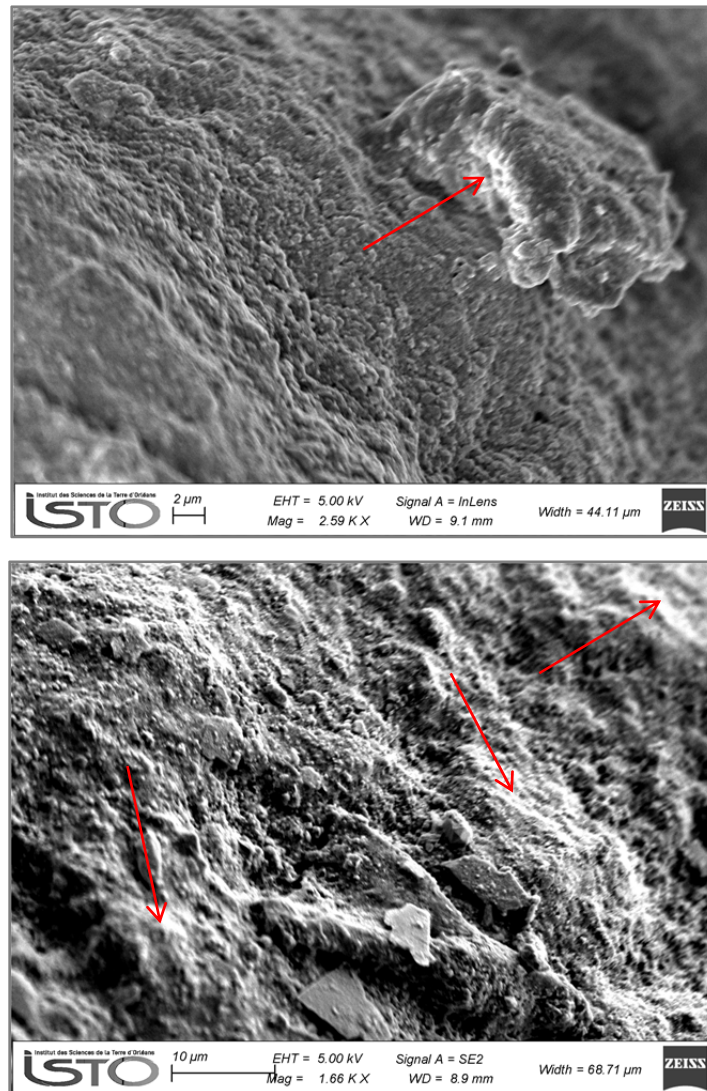
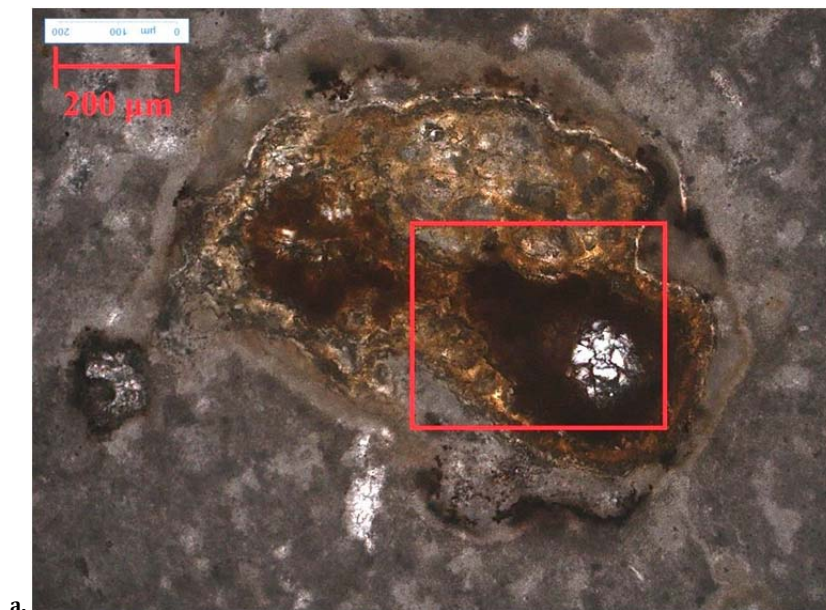


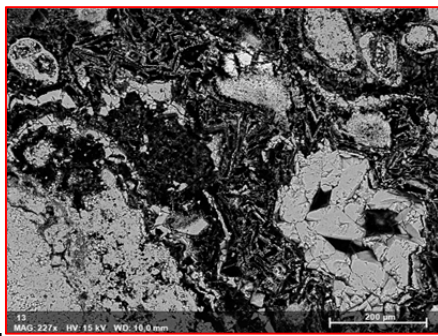
Figure 13- 19 Profil d'oxydation sur un échantillon intact (prof : 7,7 m -SC2).

13.5.3. Précipitations et remplacements

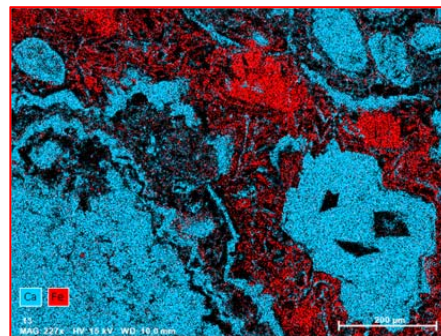
Dans la matrice calcaire, on observe assez souvent des zones d'oxydation mises en évidence par la présence d'oxydes de fer (fig. 13-20).



a.



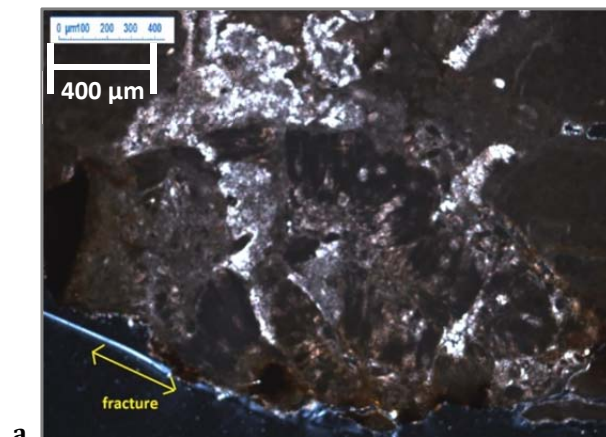
b.



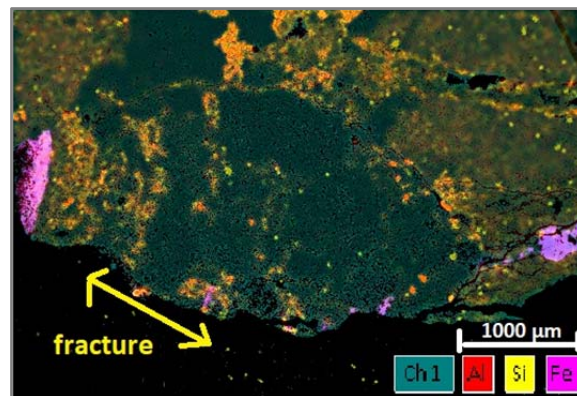
c.

Figure 13- 20 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) présence des oxydes de fer dans la roche, EDS, c) cartographie des espèces chimiques présentes dans la matrice calcaire altérée (prof.: 11 m –SC2).

Ces précipitations d'oxydes de fer, présentes dans les fractures naturelles, ont été caractérisées. Les figures 13-21 et 13-22 présentent deux cartographies d'une coupe longitudinale par rapport à une fissure. On observe une accumulation d'oxyde de fer plus importante sur la surface en contact direct avec la fracture. Par contre, au-delà de la fracture (dans la matrice), on observe des minéraux riches en Si, Al, Mg et Fe. La figure 13-22-c est une cartographie en échelle d'intensité relative, qui présente les éléments chimiques à proximité de la fracture naturelle de l'échantillon. On observe la plus forte intensité dans les zones rouges dans lesquelles les Al et Si sont distribués et probablement liés dans une même structure cristallographique. Cette relation est un indice de la présence de phyllosilicates d'origine secondaire. La figure 13-22-b, montre la distribution de fer dans la même zone. La plus forte intensité se trouve dans la surface exposée de la roche, laquelle est probablement liée aux écoulements des eaux souterraines.

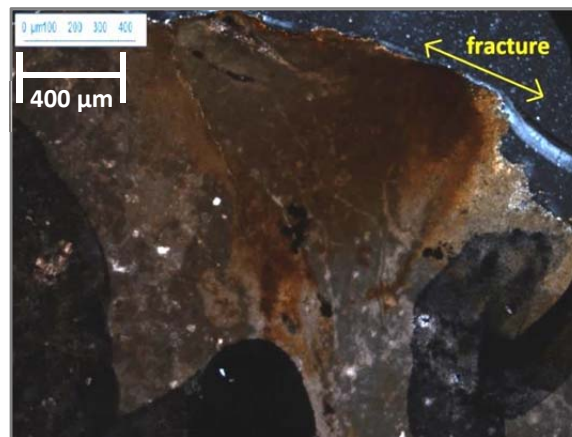


a.

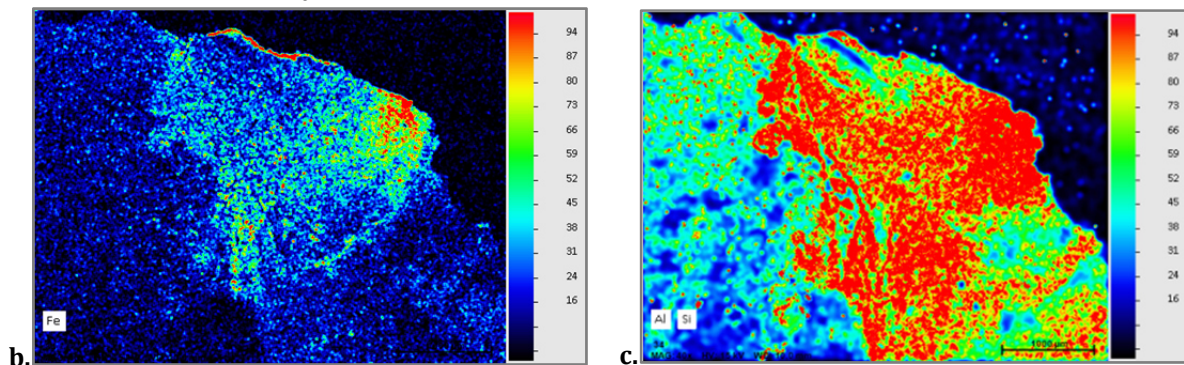


b.

Figure 13- 21 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie des espèces chimiques présentes sur la fracturation de la roche calcaire. (prof.: 9,3 m -SC2). Ch1 est l'image en arrière générée par défaut par le détecteur EDS.



a.



b.

c.

Figure 13- 22 a) Image obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie de la distribution de Fe en échelle d'intensité relative, c) cartographie de la distribution de Si-Al dans la matrice calcaire en échelle d'intensité relative (prof: 11,70 m -SC2).

13.5.4. *Vacuoles*

La présence d'oxydes dans les vacuoles de dissolution est souvent observée (fig. 13-23 et 13-24). Dans la figure 13-23-b, on observe une recristallisation de calcite dans la cavité créée par dissolution et une espèce d'anneau formé par des dépôts d'oxyde de fer, d'ailleurs bien démarqué. Au-delà de cette zone, on trouve une zone plutôt riche en silice et aluminium probablement lié à la présence de phyllosilicates d'origine secondaire (fig. 13-23-c).

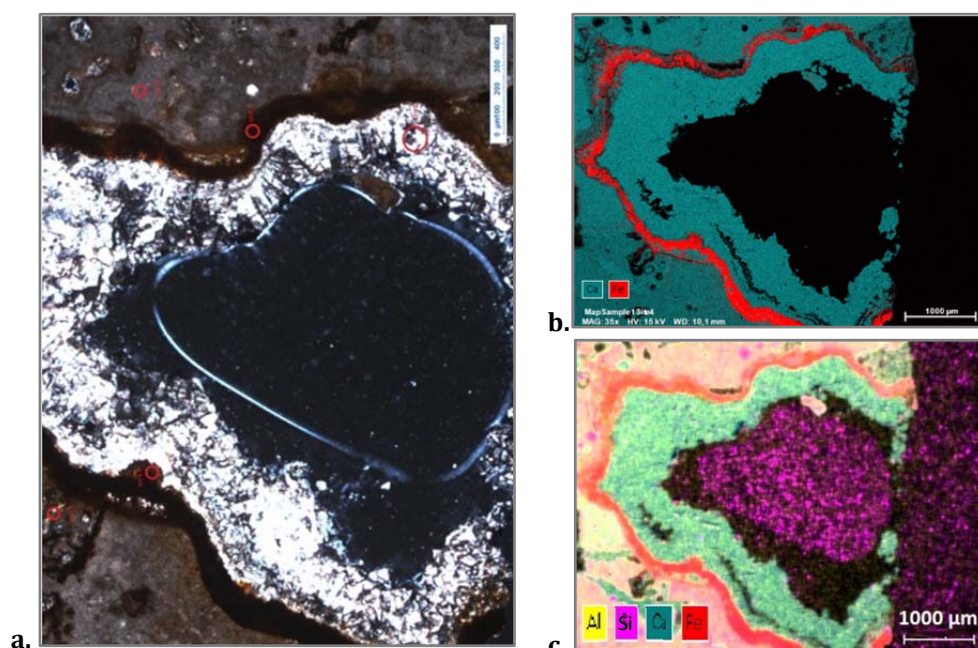


Figure 13- 23 a) Image d'une cavité de dissolution obtenue sous microscope optique en LPA, b) cartographie (EDS) de la distribution de Ca-Fe, c) cartographie (EDS) de la distribution de Al - Si - Ca - Fe dans la matrice (prof: 11 m -SC2).

Dans un autre échantillon de roche marquée par des épisodes de dissolution, des traces d'oxydes de fer sont présentes uniquement autour des vacuoles (fig. 13-24-a et -b).

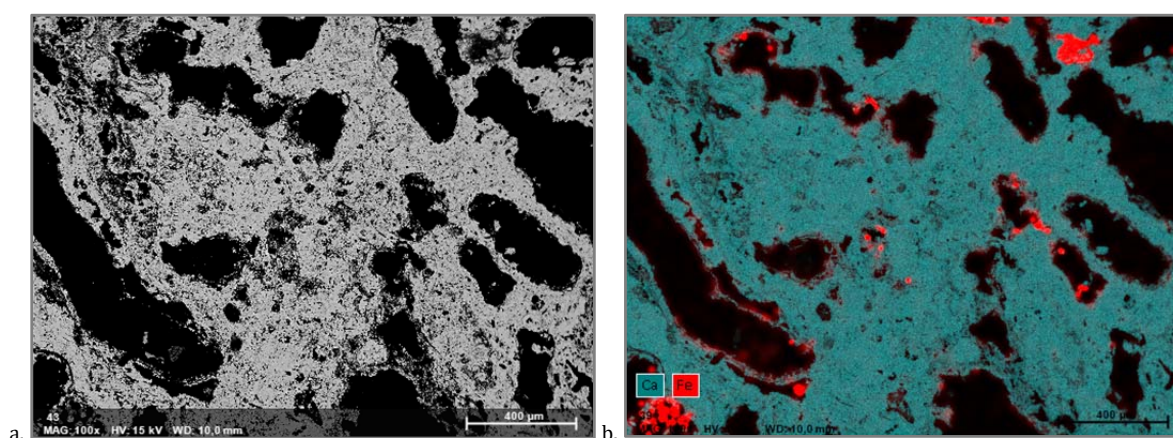


Figure 13- 24 a) Image des cavités de dissolution obtenues sous MEB, b) cartographie (EDS) de la distribution de Fe - Ca (prof: 7,5 m -SC2).

L'analyse chimique la plus souvent obtenue sur les zones de précipitation des oxydes de fer donne la composition suivante:

Tableau 13- 4 Analyse chimique sous forme d'oxydes sur les endroits de précipitation dans la matrice calcaire (prof : 11 m –SC2).

Elément	At. No.	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Comp.	Sto. [%]	Sto. Norm. [%]	abs. error [%]
Fer	26	79,87	64,69	37,09	FeO	102,76	83,22	2,36
Silicium	14	7,11	5,76	6,56	SiO ₂	15,21	12,32	0,32
Calcium	20	1,82	1,47	1,18	CaO	2,54	2,06	0,08
Aluminium	13	1,12	0,91	1,08	Al ₂ O ₃	2,12	1,72	0,08
Magnésium	12	0,41	0,34	0,44	MgO	0,69	0,56	0,05
Phosphore	15	0,07	0,06	0,06	P ₂ O ₅	0,16	0,13	0,03

Selon les résultats stœchiométriques normalisés, on a plus de 80 % d'oxydes de fer. On trouve aussi la présence de Si, Ca, Al, Mg, etc., en forme d'éléments secondaires dans le réseau cristallin des oxydes de fer.

13.5.5. Altération de la matrice

Le remplacement quasiment total de la matrice calcaire est observé dans les endroits où il y a eu formation et précipitation de minéraux argileux ou de phyllosilicates. Par exemple, la figure 13-25 montre une surface d'altération où un type d'argile semble remplacer les cristaux de calcite constituant la matrice de la roche saine. Dans la figure 13-25-c, un cristal de calcite est remplacé par de la palygorskite. La composition chimique sous forme d'oxydes est présentée dans le tableau 13-5 et la formule chimique obtenue dans le tableau 13-6, p. 256. C'est un mélange de Si-Al-Fe-Mg avec très peu de Ca.

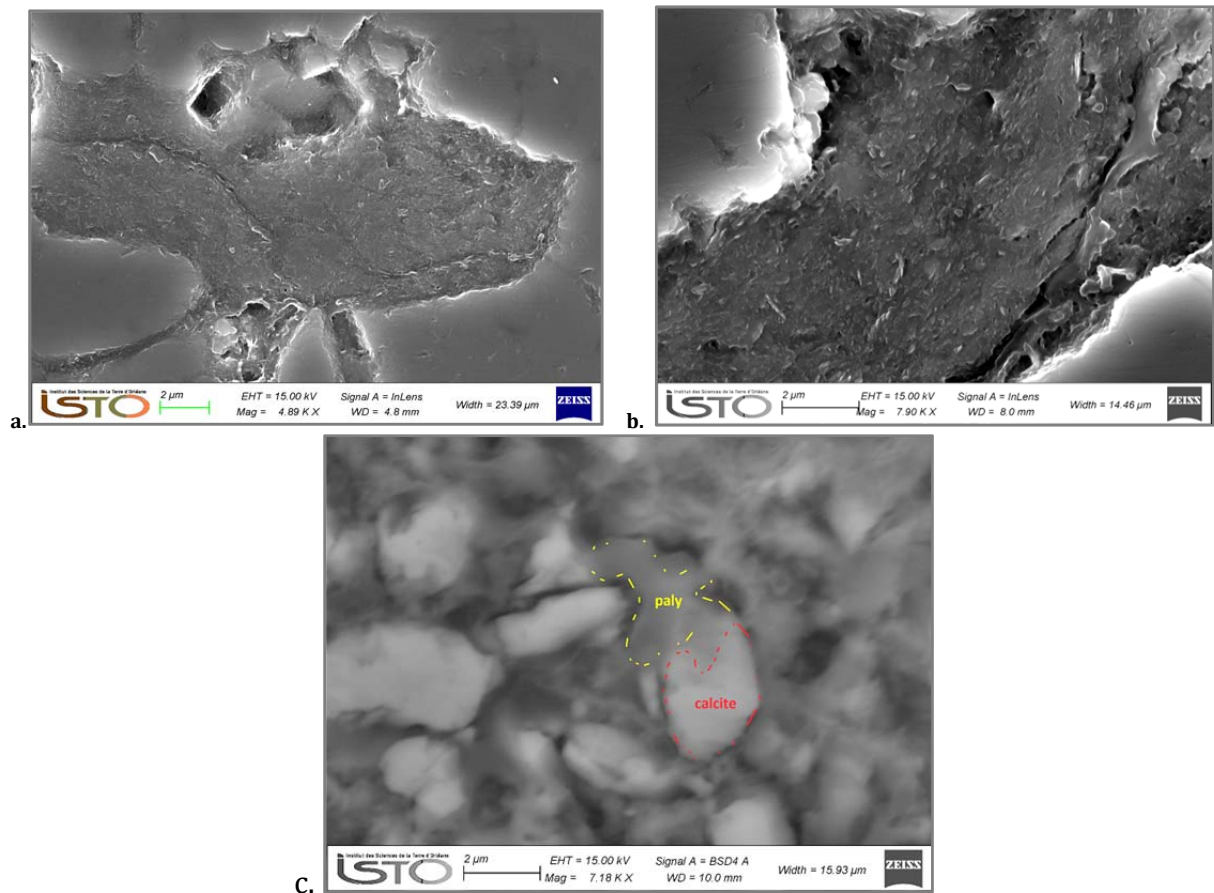
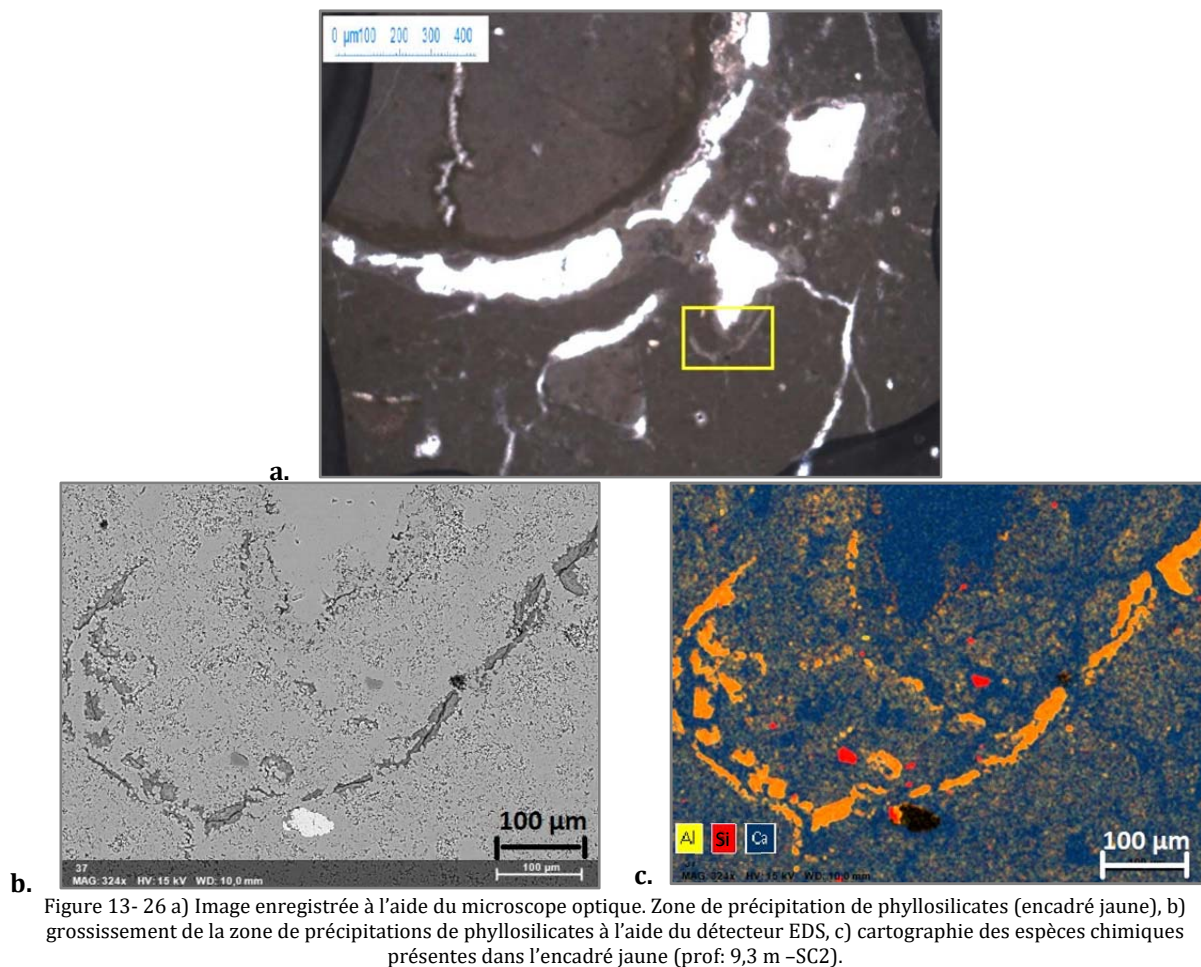


Figure 13- 25 a-b) Remplacement de la calcite par des minéraux argileux (EDS) (prof: 9,3 m-SC2), c) transformation d'un cristal de calcite en palygorskite (prof : 11,7 m-SC2).

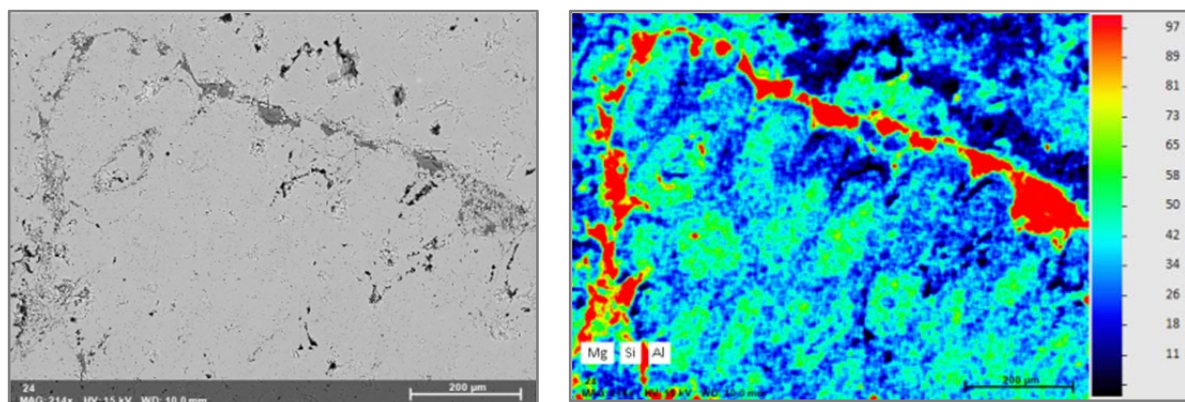
Tableau 13- 5 Analyse chimique en oxydes sur les zones d'altération de la matrice calcaire (prof : 11,7 m -SC2).

Elément	At. No.	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Comp.	Sto. [%]	Sto. Norm. [%]	abs. error [%]
Silicium	14	28,36	28,83	21,60	SiO ₂	60,68	61,68	1,20
Aluminium	13	11,46	11,65	9,09	Al ₂ O ₃	21,65	22,01	0,56
Fer	26	4,81	4,88	1,84	FeO	6,18	6,28	0,17
Magnésium	12	3,03	3,08	2,67	MgO	5,03	5,11	0,19
Potassium	19	2,98	3,03	1,63	K ₂ O	3,59	3,65	0,12
Calcium	20	0,74	0,76	0,40	CaO	1,04	1,06	0,05
Sodium	11	0,15	0,15	0,14	Na ₂ O	0,21	0,21	0,04

On peut aussi observer la distribution des éléments chimiques dans les figures 13-26 et 13-27.



D'après les observations et les analyses chimiques, les zones de remplacement de la calcite par les phyllosilicates se trouvent plus souvent au niveau des joints entre les grains, dans les zones proches des fissures (fig. 13-26) et dans la périphérie de microfossiles (fig. 13-27).



Dans la figure 13-27-b, par exemple, on observe un microfossile de type radiolaire dont la calcite a été remplacée principalement au niveau de son périmètre. Les trois éléments chimiques principaux des phyllosilicates (Mg-Si-Al) sont présents en majeure concentration dans les zones rouges, selon l'échelle de couleurs.

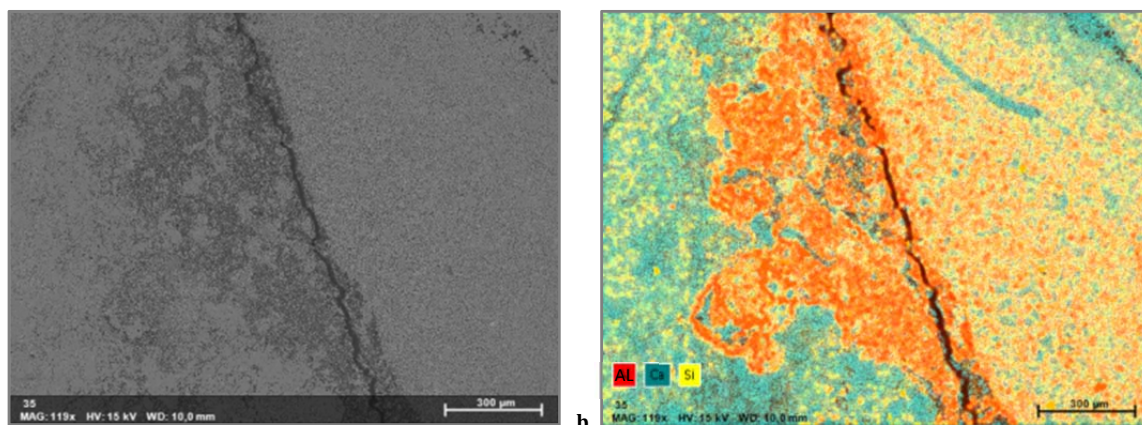


Figure 13- 28 a) Remplacement de la calcite par des minéraux argileux à proximité d'une microfissure (EDS), b) cartographie Si - Al - Mg d'une microfissure observé dans la matrice calcaire (prof.: 11,70 m -SC2).

On a pu observer également la présence de microfissures (entre 10-20 µm d'épaisseur), avec moins d'oxydes de fer, mais avec un remplacement plus importante de la matrice par des phyllosilicates dans la proximité de la fissure (fig. 13-28).

13.5.6. Formule chimique des espèces minérales

Après les analyses chimiques réalisées sur les différents endroits cités préalablement, les minéraux plus souvent retrouvés ont la composition suivante:

Tableau 13- 6 Synthèse des formules chimiques calculées pour les minéraux trouvés dans la roche calcaire à partir des analyses EDS.

I.D	Minéral	Formule chimique
11 m - SC2 (roche)	Calcite (fig. 13-10-a)	$\text{Ca}_{1.98}\text{Mg}_{0.01}\text{Fe}^{3+}_{0.003}\text{Si}_{0.001}\text{Al}_{0.001}\text{CO}_3$
	Goethite (fig. 13-20-c, rouge)	$\text{Fe}^{3+}_{0.87}\text{Si}_{0.09}\text{Al}_{0.04}\text{O}(\text{OH})$
	Quartz (fig. 13-14-a)	$\text{Si}_{0.998}\text{Ca}_{0.002}\text{Al}_{0.001}\text{O}_2$
	Calcite (fig. 13-14-c, bleu)	$\text{Ca}_{1.994}\text{Si}_{0.003}\text{CO}_3$
	Palygorskite (fig. 13-13-c)	$(\text{Si}_{3.89}\text{Al}_{0.11})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.19}\text{Mg}_{0.57}\text{Fe}^{3+}_{0.34})(\text{OH})_2\text{K}_{0.28}\text{Ca}_{0.06}$
	Palygorskite (fig. 13-13d)	$(\text{Si}_{3.9}\text{Al}_{0.1})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.19}\text{Mg}_{0.56}\text{Fe}^{3+}_{0.33})(\text{OH})_2\text{K}_{0.28}\text{Ca}_{0.07}$
	Palygorskite (fig. 13-27-b, rouge)	$(\text{Si}_{3.85}\text{Al}_{0.15})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.15}\text{Mg}_{0.61}\text{Fe}^{3+}_{0.31})(\text{OH})_2\text{K}_{0.22}\text{Ca}_{0.15}$
9,3 m - SC2 (roche)	Palyg (-Smect) (fig. 13-15, alt.)	$(\text{Si}_{3.73}\text{Al}_{0.27})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.3}\text{Mg}_{0.44}\text{Fe}^{3+}_{0.32}\text{Ti}_{0.02})(\text{OH})_2\text{K}_{0.33}\text{Ca}_{0.07}$
	Palyg (-Smect) (fig. 13-26-c, orange)	$(\text{Si}_{3.61}\text{Al}_{0.39})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.28}\text{Mg}_{0.38}\text{Fe}^{3+}_{0.36}\text{Ti}_{0.03})(\text{OH})_2\text{K}_{0.34}\text{Ca}_{0.12}$
	Palyg (-Smect) (fig. 13-26-c, orange)	$(\text{Si}_{3.63}\text{Al}_{0.37})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.3}\text{Mg}_{0.36}\text{Fe}^{3+}_{0.37}\text{Ti}_{0.02})(\text{OH})_2\text{K}_{0.35}\text{Ca}_{0.1}$
	Palyg (-Smect) (fig. 13-26-c, orange)	$(\text{Si}_{3.71}\text{Al}_{0.29})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.31}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}^{3+}_{0.35})(\text{OH})_2\text{K}_{0.37}\text{Ca}_{0.13}$
	Palygorskite (fig. 13-21-b, orange)	$(\text{Si}_{3.97}\text{Al}_{0.03})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.14}\text{Mg}_{0.76}\text{Fe}^{3+}_{0.26})(\text{OH})_2\text{K}_{0.15}\text{Ca}_{0.07}\text{Na}_{0.01}$
11,7 m -SC2 (roche)	Palyg (-Smect) (fig. 13-25-c)	$(\text{Si}_{3.52}\text{Al}_{0.48})\text{O}_{10}(\text{Al}_{0.9}\text{Mg}_{0.31}\text{Fe}^{3+}_{0.7})(\text{OH})_2\text{K}_{0.3}\text{Ca}_{0.38}$
	Palygorskite (fig. 13-25-c)	$(\text{Si}_{3.73}\text{Al}_{0.27})\text{O}_{10}(\text{Al}_{0.86}\text{Mg}_{0.68}\text{Fe}^{3+}_{0.47})(\text{OH})_2\text{K}_{0.13}\text{Ca}_{0.41}\text{Na}_{0.01}$
	Illite (fig. 13-4-b, fract.)	$(\text{Si}_{3.82}\text{Al}_{0.18})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.1}\text{Mg}_{0.17}\text{Fe}^{3+}_{0.28}\text{Mn}_{0.17})(\text{OH})_2\text{K}_{0.82}\text{Ca}_{0.12}\text{Na}_{0.3}$
	Illite (fig. 13-4-b, fract.)	$(\text{Si}_{3.91}\text{Al}_{0.09})\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.27}\text{Mg}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_{0.21})(\text{OH})_2\text{K}_{0.75}\text{Na}_{0.3}$

L'oxyde de fer plus couramment retrouvé dans les endroits de fracturation et/ou de dépôt est la goethite, de formule chimique théorique FeO(OH) . Ce minéral a été trouvé parfois associé à la calcite et avec des impuretés comme Al et Si. Sa détection par DRX a été très difficile, car sa proportion par rapport à la calcite ou au quartz est très faible. Par contre, sa distribution spatiale dans la matrice calcaire a été plutôt bien observée avec le détecteur EDS (fig. 13-20 à 13-24).

La calcite trouvée dans la matrice saine a montré une pureté assez élevée avec de faibles quantités de Mg. Par contre, dans les endroits où on trouve les phyllosilicates, la calcite a presque disparu.

Le diagramme ternaire $\text{M}^+-4\text{Si}-\text{R}^{2+}$ (fig. 13-29) permet de représenter efficacement les différents domaines de phyllosilicates, notamment pour les mélanges dans les milieux naturels, où la silice est associée à des minéraux différents des silicates, par exemple, aux carbonates (Meunier et Velde, 1989 d'après Meunier, 2013). La formule chimique de certains points sur le diagramme est présentée dans le tableau 13-6. Le phyllosilicate qui prédomine dans la matrice calcaire est la palygorskite. Sa formule théorique est $(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{Al,Mg})_2(\text{OH})_2$. Cependant, les formules calculées possèdent quelques quantités de cations compensateurs (Ca^{2+} , K^+). Sa formule chimique s'approche de celle d'une smectite de type montmorillonite (fig. 13-29) notamment en présence de ces deux cations compensateurs. Les minéraux représentés avec (-Smect) dans le tableau 13-7 sont des espèces difficiles à distinguer entre palygorskite, smectite ou un mélange de deux. Selon le triangle de la figure 13-29, il est probable que ça soit des espèces inter-stratifiées où la palygorskite est dominante. L'analyse de DRX permet de savoir quelle phase est vraiment présente dans la fraction argileuse.

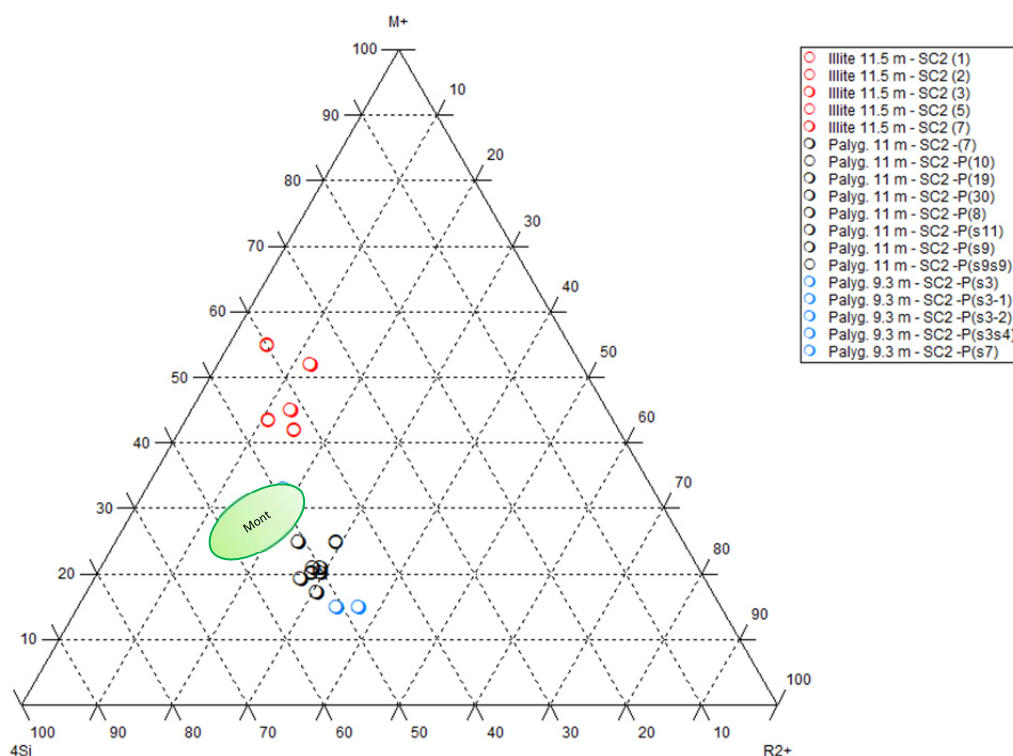


Figure 13- 29 Projection de phyllosilicates pour l'analyse de mélanges complexes.

L'observation directe de la smectite par l'analyse d'images a été très difficile. En revanche, les résultats DRX ont validé la présence de la smectite. Il est donc probable que, dans certains endroits, la palygorskite subisse une transformation partielle ou totale en smectite à cause d'une perte majeure de Mg^{2+} en conséquence d'un lessivage important (flux d'eau). On peut conclure que, dans les endroits où l'eau reste stockée dans la roche (pores nanométriques et microfissures) et ne se déplace qu'à travers le phénomène de diffusion chimique, le phyllosilicate qui précipite en majeure proportion est la palygorskite. Quand le régime hydrique devient plus important (concentration de la solution diminue dans les pores micrométriques), c'est la smectite de type montmorillonite qui précipite dans la matrice calcaire (Meunier, 2005).

Les endroits où le lessivage de la roche a été plus important se trouvent au niveau de fractures et fissures d'échelle centimétrique où l'écoulement est gravitaire. La présence d'oxydes de fer et de la kaolinite est un indice d'un régime hydrique important où la concentration de cations ne pas possible à cause d'une hydrolyse intense. Cela signifie que les fractures naturelles observées dans la roche dure participent ou ont participé aux processus de transport d'eaux souterraines.

CHAPITRE 14: PROPRIETES HYDRIQUES DES MATERIAUX DE LA ZNS

14.1. Mouillabilité des roches et tension superficielle de la phase liquide.

14.1.1. Angle de contact « eau-roche »

La figure 14-1 montre les images enregistrées pendant la mesure de l'angle de contact entre la goutte d'eau et le substrat (roche calcaire).

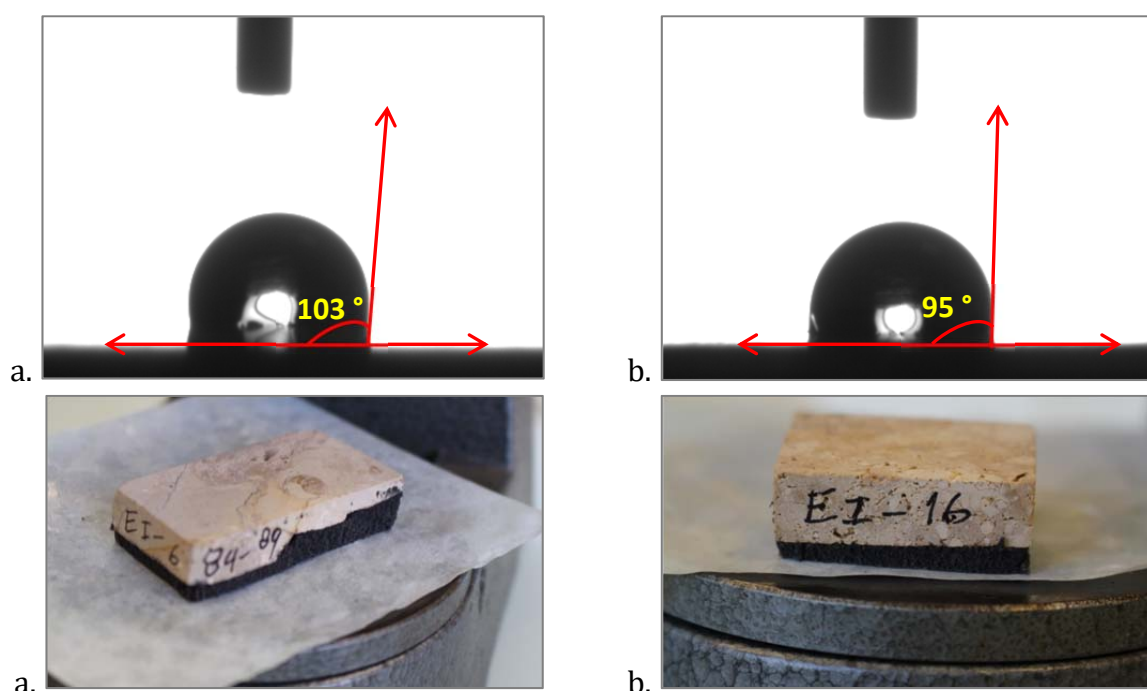


Figure 14- 1 Angle de contact entre une goutte d'une solution aqueuse et la surface d'une roche calcaire saine (a) et altérée (b).

L'angle de contact formé entre la goutte d'environ 6 μL et la phase solide a été mesuré sur la surface de deux échantillons calcaires : une surface saine et une surface légèrement altérée. La surface saine a montré une mouillabilité plus faible que la surface altérée. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants. L'angle de contact α obtenu est compris entre 70° et 110°. Selon Tiab et Donaldson (2004), la mouillabilité des échantillons des roches calcaires est « neutre ». L'angle de contact des échantillons meubles de la ZNS n'a pas été mesuré, car la goutte était absorbée très rapidement par la surface, donc une valeur de zéro a été supposée pour les calculs de potentiel matriciel.

Tableau 14- 1 Angle de contact moyen mesuré sur une surface de roche calcaire saine de la ZNS.

Essai	Liquide	Substrat	α (°)	Vol. (μL)	Modèle
1	Phase mobile	RC saine - spot 1	89,39	4,54	Polynomial
2	Phase mobile	RC saine - spot 2	82,14	10,38	Polynomial
3	Phase mobile	RC saine - spot 3	112,94	5,71	Polynomial
4	Phase mobile	RC saine - spot 4	96,54	5,11	Polynomial
Moy.:			95,25	6,43	
Coeff. Var (%):			13,83	41,53	

Tableau 14- 2 Angle de contact moyen mesuré sur une surface de roche calcaire altérée de la ZNS.

Essai	Liquide	Substrat	α (°)	Vol. (μL)	Modèle
1	Phase mobile	RC altérée – spot 1	95,27	5,05	Polynomial
2	Phase mobile	RC altérée – spot 2	111,34	6,41	Polynomial
3	Phase mobile	RC altérée – spot 3	92,94	5,21	Polynomial
4	Phase mobile	RC altérée – spot 4	111,82	6,42	Polynomial
Moy.:			102,84	5,77	
Coeff. Var (%):			9,86	12,86	

14.1.2. Tension superficielle de la phase mobile.

La figure 14-2 présente un zoom de la goutte de solution aqueuse (§9.3.2) qui permet de calculer la tension exercée par les molécules d'eau en contact avec l'air à l'aide du modèle Laplace-Young.



Figure 14- 2 Vue de la goutte de solution aqueuse utilisée pour la mesure de tension de surface (grossissement x20)

La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 14-3. Après plusieurs mesures sur deux lots de la même solution, la tension moyenne calculée est de 80,96 ($\pm 1,15$) mN/m, légèrement plus élevée que celle de l'eau pure à une température de 20°C (72,8 mN/m).

Tableau 14- 3 Mesures de la tension de surface de la phase mobile.

Mesure	Liquide	ρ_w (g/cm3)	σ [mN/m]	Model
1	Lot 1	1	80,95	L&Y
2		1	82,7	L&Y
3		1	80,2	L&Y
4		1	79,6	L&Y
5		1	83,25	L&Y
6		1	81,45	L&Y
7		1	80,35	L&Y
8		1	80,5	L&Y
9		1	80,65	L&Y
10		1	80,5	L&Y
1	Lot 2	1	79,25	L&Y
2		1	79,6	L&Y
3		1	82,95	L&Y
4		1	81,9	L&Y
5		1	80,05	L&Y
6		1	81,95	L&Y
7		1	81,15	L&Y
8		1	80,35	L&Y
9		1	80,85	L&Y
10		1	71,5	L&Y
		Moy.:	80,96	
		Coeff. Var (%):	1,4	

14.1.3. Calcul du PEA des échantillons de la ZNS

Les valeurs du potentiel matriciel au PEA des différents faciès de la ZNS ont été calculées à partir des mesures de distribution de taille de pores, d'angle de contact et de tension superficielle (tab. 14-4). La valeur de succion correspondant à la première étape de l'essai multi-step pour les échantillons de sol et pour certains échantillons limoneux de marne a été établie à 2 KPa (20 cm), car le débit d'extraction cumulé attendu pour une valeur de succion inférieure (par exemple, 1 KPa) était négligeable.

Tableau 14- 4 Estimation du potentiel matriciel au PEA des échantillons pour les essais d'extraction multistep. PEA : potentiel matriciel au point d'entrée d'air. $\phi_{macro-moy}$ est la taille de macropores. Elle est calculée à partir des courbes de distribution de taille de pores.

Faciès	Numérotation (prof)	α (°)	σ (mN/m) @ 20°	$\phi_{macro-moy}$ (μm)	Potentiel au PEA (KPa)	Succion de la 1ère étape multi-step (KPa)
Sol	45 cm - SC1	0	80,96	506	-0,64	2
	65 cm - SC2	0	80,96	320	-1,01	2
	75 cm - SC2	0	80,96	320	-1,01	2
	1,5 m - SC3	0	80,96	470	-0,69	2
Marne	5 m - SC1	0	80,96	453	-0,71	1
	1,15 m - SC2	0	80,96	563	-0,58	1
	4,5 m - SC2	0	80,96	631	-0,51	1
	6,3 m - SC2	0	80,96	533	-0,61	2
Sable	3,75 m - SC2	0	80,96	433	-0,75	1
	4,1 m - SC3	0	80,96	388	-0,83	1
Roche	5,17 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1
	6,85 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1
	7,5 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1
	13,25 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1
	14,6 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1
	16,15 m - SC2	99	80,96	inconnu	-	1

L'effet des accessoires liés au montage de l'échantillon a été mesuré préalablement pour quantifier l'impact sur les mesures.

14.2. Propriétés hydriques de la pierre poreuse

14.2.1. Essai en condition saturée

La figure 14-3 présente les données acquises au laboratoire en conditions de saturation et en régime permanent (même débit en entrée et en sortie).

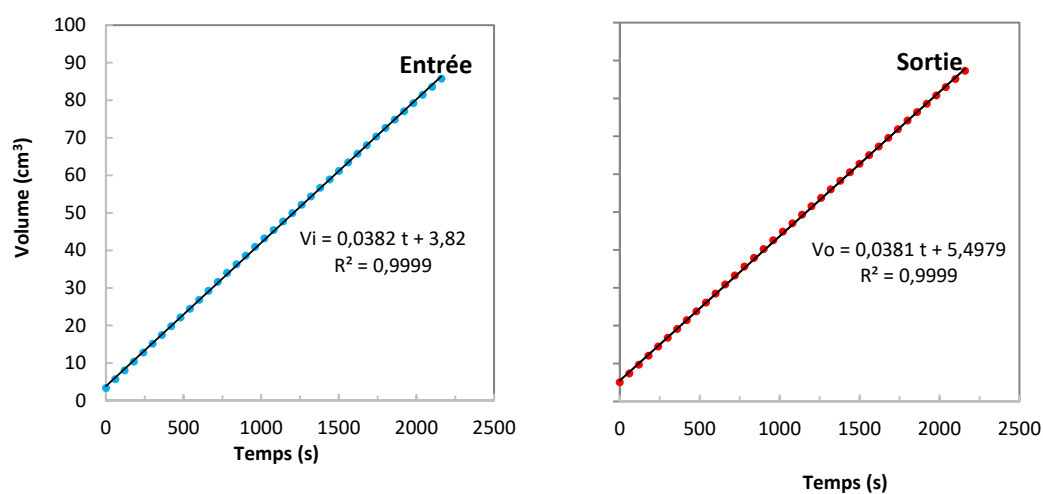


Figure 14- 3 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.

La valeur moyenne de conductivité hydraulique obtenue pour la pierre poreuse est de 3,61 ($\pm 1,28$) cm/j.

14.2.2. Essai en condition non saturée

Les données obtenues correspondant à l'essai multistep sont présentées dans la figure 14-4. Cinq paliers de pression ont été lancés pour décrire le comportement hydrique de la pierre poreuse. La première étape a été lancée avec une succion de 10 cm, suivi de paliers à 30, 60, 100 et 200 cm. On observe qu'après le premier palier de 1 KPa (10 cm), la presque totalité de l'eau stockée dans le réseau de pores de la pierre poreuse a été drainée. Environ 11 cm³ d'eau ont été recueillis à la sortie, pour une succion de 10 cmH₂O. Pendant les étapes suivantes, le volume cumulé ne varie presque plus (fig. 14-4). A la fin de l'essai, le volume total drainé est de 11,57 cm³. Après le séchage à l'étuve, la

quantité d'eau restant calculée par pesage est de 1,63 g. La rétention à saturation de la pierre poreuse, θ_{sat} , est de 55,96 %.

La teneur en eau diminue de 56 % à 9 % après le premier palier (fig. 14-5-b). La valeur de K diminue très rapidement pour des valeurs de teneur en eau inférieures à 10 %. Autrement dit, la pierre se désature au cours du premier palier.

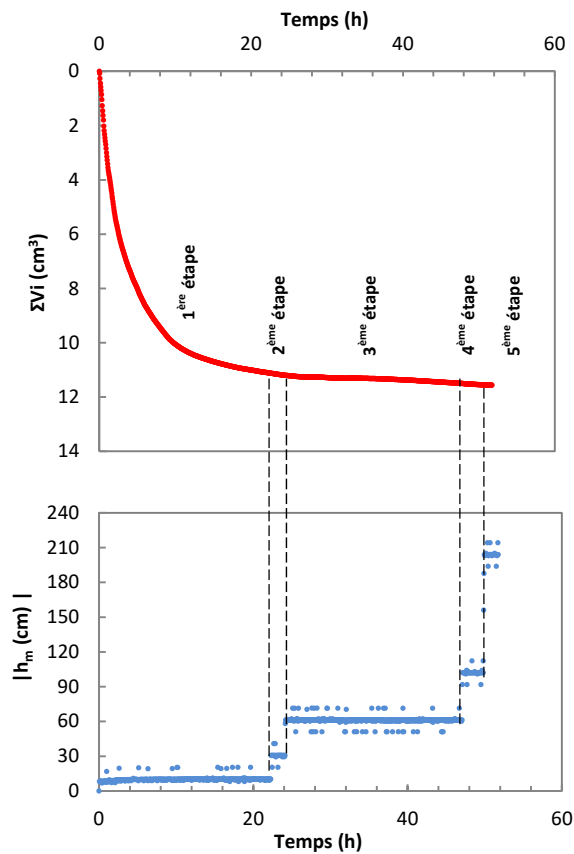


Figure 14- 4 Volume extrait cumulé (rouge) et étapes de succion (bleu) pendant l'essai multistep de la pierre poreuse.

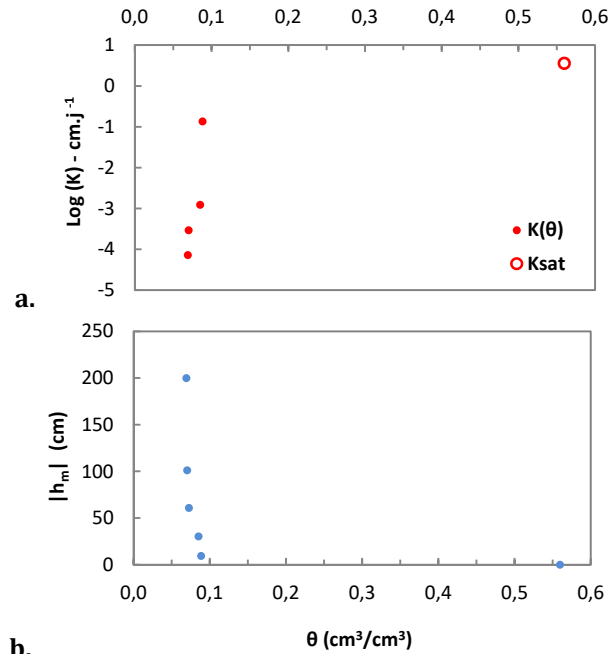


Figure 14- 5 a) Courbe de $K(h)$ et b) $\theta(h)$ de la pierre poreuse.

14.3. Propriétés hydriques de la pâte de billes de verre

14.3.1. Essai en condition saturée

La mesure de K_{sat} de la pâte de billes de verre a été faite en régime permanent (fig. 14-6), avec le même protocole de mesure que celui utilisé pour les échantillons de la ZNS. Le protocole de montage dans la cellule triaxiale est expliqué dans la section 7.3.

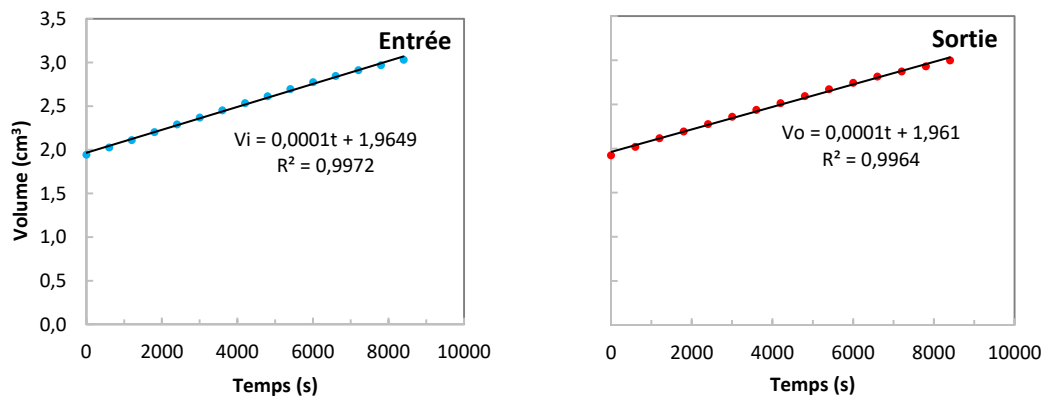


Figure 14- 6 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.

La valeur moyenne de conductivité hydraulique obtenue pour la pâte de billes de verre est de $2,94.10^{-3} (\pm 0,4.10^{-3}) \text{ cm/j}$. Cette valeur est très faible par rapport à celle mesurée (228 cm/j) par Viel (2016).

Tableau 14- 5 Synthèse de la mesure du K_{sat} de la pâte de billes de verre. D_e est le diamètre nominal de l'échantillon, L est la hauteur de l'échantillon, ρ_b est la masse volumique apparente, ΔP est la charge hydraulique imposée dans l'échantillon, Q est le débit en régime permanent, K_{sat} est la conductivité hydraulique à saturation, R_e est le numéro de Reynolds, t est la durée de temps de l'essai, ET est l'écart type standard et CV est le coefficient de variation de la mesure de K_{sat}

Données essais – K_{sat}	
D_e (cm)	5,4
L (cm)	2
ρ_b (g/cm ³)	1,46
ΔP (cm)	300
Q (cm ³ /s)	1,29E-04
K_{sat} (cm/j)	2,94E-3
R_e (adim)	$1,21 \cdot 10^{-5}$
t (h)	2,33
ET (cm/j)	$3,99 \cdot 10^{-4}$
CV (%)	14

14.3.2. Essai en condition non saturée

Le tableau 14-6 est une synthèse de la mesure à la fin de l'essai multistep.

Tableau 14- 6 Synthèse de mesures à la fin de l'essai en condition non saturée. M_{e-f} est la masse de l'échantillon humide à la fin de l'essai multistep, M_d est la masse de l'échantillon séché à l'étuve, M_{ret} est la masse d'eau résiduelle dans l'échantillon à la fin de l'essai multistep, M_{wT} est la masse totale d'eau stockée dans l'échantillon saturé, ΣV_{wi} est le volume d'eau drainé par l'échantillon à la fin de l'essai.

Synthèse de résultats (fin essai)	
M_{e-f} (g)	73,65
M_d (g)	71,34
M_{ret} (g)	2,31
M_{wT} (g)	23,01
ΣV_{wi} (cm ³)	21,20
Etapes (cm)	10, 20, 60, 100, 200, 330, 600

L'essai s'est déroulé en 7 étapes de succion dont la première correspond à 10 cm, suivi de paliers à 20, 60, 100, 200, 330 et 600 cm (fig. 14-7). Les quatre premières étapes ont montré une désaturation graduelle d'environ 10 cm³. C'est après 100 cm de succion que l'échantillon se désature largement (fig. 14-7). Le volume drainé pendant cette étape est d'environ 50 % de la totalité du volume cumulé. Les deux dernières étapes sont caractérisées par un débit d'extraction négligeable. Après le séchage à l'étuve et pesage, la quantité d'eau restant dans l'échantillon est de 1,81 g.

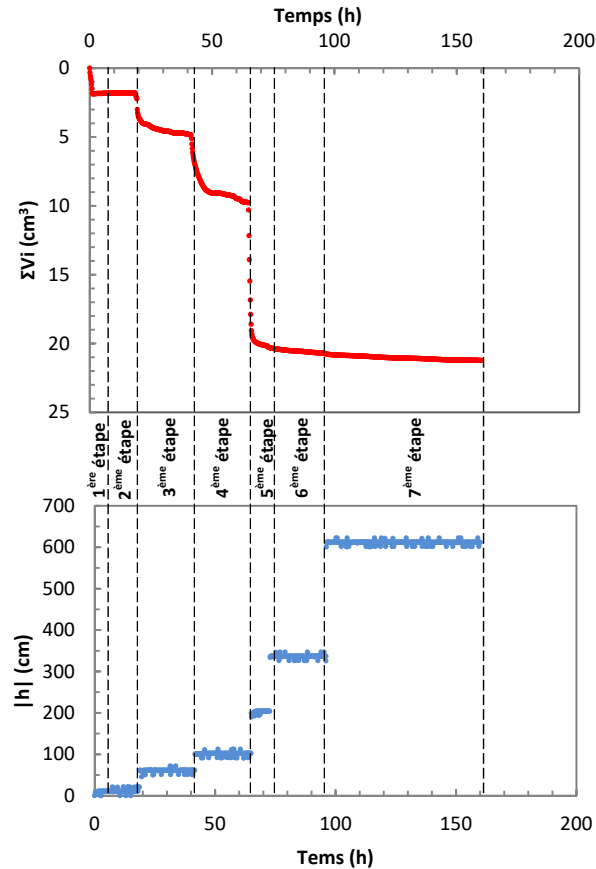


Figure 14- 7 Volume extrait cumulé (rouge) et étapes de succion (bleu) pendant l'essai multi-step de la pâte de billes de verre.

Les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique obtenues à partir des données traitées sont montrées dans la figure 14-8 ci-dessous:

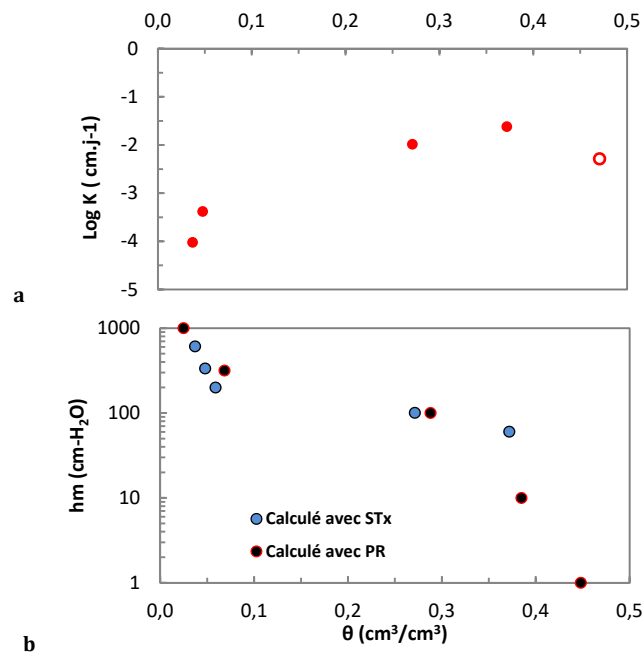


Figure 14- 8 a) Courbe de conductivité hgydraulique avec la methode multistep, b) courbes de rétention en eau obtenues à l'aide de la presse de Richards et de la methode multistep. PR : presse de Richards, STx : système triaxial, valeur de K_{sat} : symbole vide.

La diminution de la teneur en eau de la pâte des billes de verre est graduelle uniforme jusqu'à environ 6 %. En dessous, on observe un comportement asymptotique. On observe une désaturation de presque complète pour des potentiels matriciels inférieurs à -250 cm. La courbe de rétention en eau a été aussi mesurée à l'aide de la presse de Richards. Les deux courbes sont très similaires.

La conductivité hydraulique est relativement faible, malgré la nature du matériau. La valeur de teneur en eau à saturation est de 47,06 %, très proche de la valeur trouvée par Viel (2016) (47,1 %).

14.4. Propriétés hydriques de la céramique à haut point d'entrée d'air

La céramique a été testée seulement en condition saturée et en régime permanent (fig. 14-9) pour connaître l'impédance hydraulique qu'elle représente.

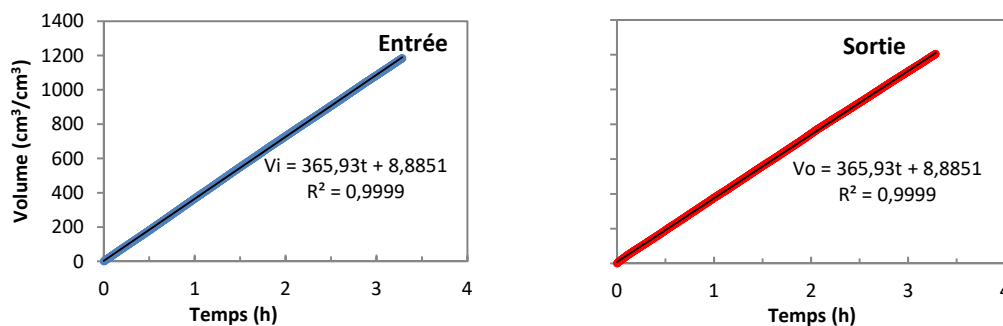


Figure 14- 9 Volume cumulé mesuré en amont (gauche) et en aval (droite) en condition de régime permanent.

La valeur de K_{sat} de la céramique est la même que celle indiquée par le fournisseur ($8,87 \cdot 10^{-6}$ cm/s). L'impédance hydraulique de la céramique (rapport L_c/K_{sat}) est 22,36 h.

14.5. Tests préalables aux mesures de propriétés hydriques

La figure 14-10-a présente, pour un échantillon de marne, à titre d'exemple, les valeurs de volume en amont (points bleus) et en aval (points rouges) recueillis pendant l'étape de saturation sans consolidation qui permet de faire sortir les bulles d'air piégées dans l'échantillon et dans le système.

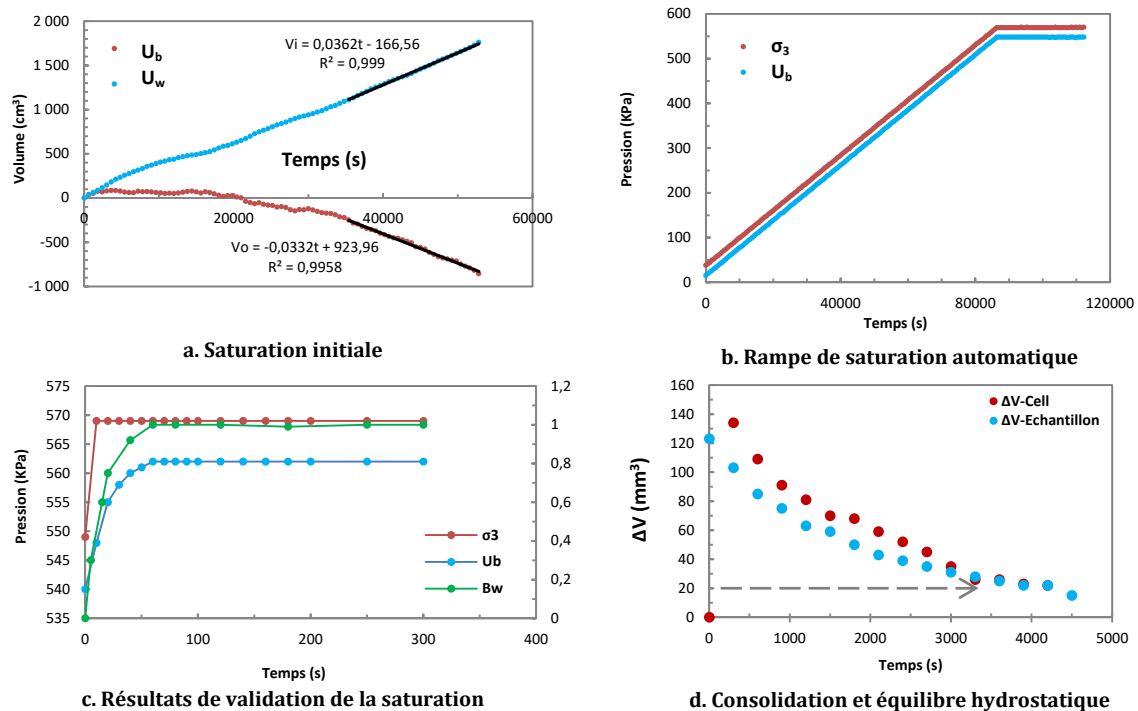


Figure 14- 10 Représentation des résultats du protocole de saturation préalable aux mesures des propriétés hydriques pour un échantillon de marne (prof: 6,3 m – SC2).

Dans un premier temps, la courbe de volume de sortie (points rouges) n'est pas droite car la condition stationnaire n'est pas atteinte qu'après 8 h (30000 secondes). Au fur et à mesure, les bulles sont chassées et l'état hydrique de l'échantillon s'approche de la saturation. En régime permanent, le débit d'entrée est égal au débit en sortie.

L'étape suivante est représentée par la figure 14-10-b. Une augmentation de la pression du système est appliquée pendant la « rampe » graduelle de saturation, tout en maintenant le gradient de pression imposé à l'échantillon. Cette technique de translation de pression (§4.7) permet de ne pas déformer l'échantillon. La rampe de pression appliquée est d'environ 23 KPa/h.

Les données de l'essai de validation de la saturation sont présentées dans la figure 14-10-c. On observe la façon dont la pression dans l'échantillon augmente à cause de l'incrément imposé au niveau de la cellule. Pour cet échantillon, le critère de saturation B_w a été vérifié 80 secondes après avoir appliqué l'incrément de pression.

Dans la figure 14-10-d, la courbe représente la variation du volume d'eau dans l'échantillon et dans la cellule lors de la consolidation de l'échantillon (§8.1.1.3). On surveille le volume de la cellule et de l'échantillon jusqu'à ce que le critère de

consolidation soit validé. L'équilibre dans l'échantillon a été atteint environ 3600 secondes après avoir lancé le test. La consolidation est atteinte relativement vite si l'échantillon est rigide. Pour un échantillon argileux ou limoneux, le temps d'équilibre peut prendre plus d'une heure.

14.6. Essais en condition saturée

Le volume cumulé en fonction du temps est enregistré pour quatre échantillons représentatifs de faciès de la ZNS (fig. 14-11). La mesure de K_{sat} a été réalisée dans l'intervalle de temps où le débit en entrée est égal au débit en sortie. La tolérance sur la différence entre les pentes est de $1.10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$. Les essais présentés dans la figure ont été faits avec un gradient de pression à travers l'échantillon (ΔP) de 5 KPa.

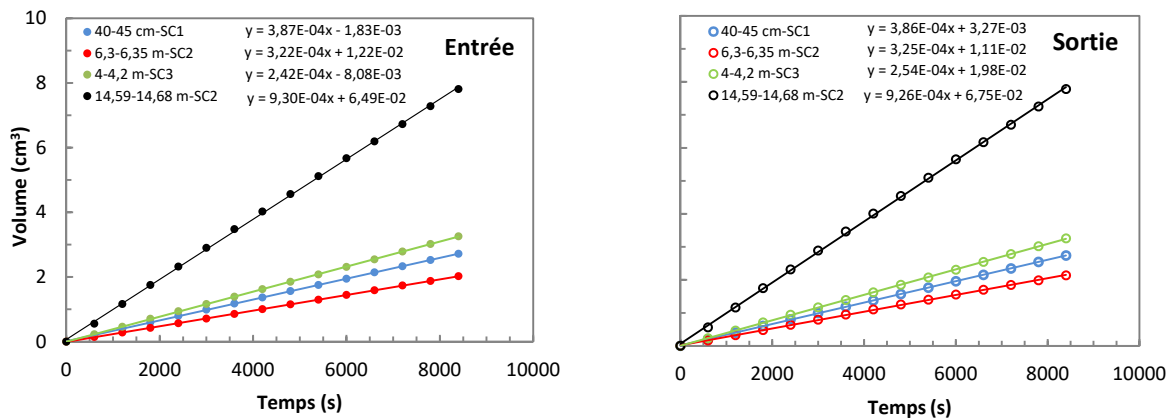


Figure 14- 11 Données de volume enregistrées pendant l'essai de K_{sat} en régime permanent et un ΔP de 5 KPa.

Parmi les quatre faciès, la roche montre le débit le plus important sous les conditions expérimentales appliquées (tab. 14-7). Parmi les faciès meubles, c'est le sable qui est le faciès le plus perméable. Le sol et le marne ont les perméabilités les plus faibles.

Tableau 14- 7 Résultats des mesures de la conductivité hydraulique à saturation.

Le symbole ^ représente une répétition sur le même échantillon. σ_c : contrainte effective de consolidation, θ_{sat} : la teneur en eau à saturation de l'échantillon, K_{sat} : la conductivité hydraulique à l'état saturée.

Faciès	Numérotation (prof.)	Texture	Caractéristiques	σ _c (Kpa)	θ _{sat} (cm³/cm³)	K _{sat} (cm/j)	CV (%)
Sol brun	40-45 cm-SC1	Limon argileux fin		5	0,45	4,54E-02	10,84
	45-50 cm-SC1	Limon argileux fin		5	0,43	2,95E-02	10,23
	60-70 cm-SC2	Limon		8	0,47	-	-
	70-80 cm-SC2	Limon		10	0,45	2,81E-03	6,87
	1,5-1,6 m-SC3	Limon fin		20	0,49	6,19E-03	25,10
				MOY :	0,46	2,10E-02	13,26
Marne	1,2-1,25 m-SC2	Limon sableux		15	0,36	2,35E-02	32,20
	1,25- 1,28 SC2	Limon sableux		15	0,35	1,59E-02	8,42
	4,42-4,6 m-SC2	Limon fin		70	0,37	8,98E-03	5,74
	5-5,1 m-SC1	Limon sableux		79,5	0,31	1,88E-03	18,22
	6,3-6,35 m-SC2	Limon fin		1	0,35	2,36E-02	8,25
				MOY :	0,3483	1,65E-02	13,08
Sable marneux	3,6-3,9 m-SC2	Limon sableux		58	0,38	9,05E-02	14,57
	4-4,2 m-SC3	Sable		64	0,43	5,07E-02	9,69
				MOY :	0,41	7,06E-02	12,13
Roche	5,1-5,25 m-SC2	Microcristalline	Fissures-altération	81,8	0,34	3,48E-02	7,97
	6,8-6,9 m-SC2		Fissures	112	0,15	4,19E-02	5,63
	7,45-7,55 m-SC2		Vacuoles-fissures	124	0,14	8,54E-04	77,88
	13,2-13,3 m-SC2		Vacuoles	241	0,15	2,83E-02	6,21
	14,59-14,68 m-SC2		Vacuoles	269,5	0,14	1,00E-01	16,39
	16,1-16,2 m-SC2		Vacuoles	300	-	1,20E+00	27,56
	16,1-16,2 m-SC2 ^		Vacuoles	300	0,16	1,40E-01	12,38
				MOY :	0,18	2,20E-01	22,00

En ce qui concerne les valeurs de conductivité hydraulique à saturation, on observe une gamme assez large pour les échantillons de sol avec une valeur maximale de $4,54.10^{-2}$ cm/j pour l'échantillon à 40-45 cm-SC1 et une valeur minimale de $2,81.10^{-3}$ cm/j pour l'échantillon à 75 cm-SC2, avec une consolidation de 5 KPa et 10 KPa respectivement. La valeur moyenne de K_{sat} est de $2,1.10^{-2}$ cm/j. Le coefficient de variation CV (%) lié à l'erreur de la mesure est donné chaque essai. Les valeurs mesurées ne présentent pas une dispersion importante autour de la moyenne pour un échantillon donné : le CV plus élevé est dans l'ordre de 25 % et le plus faible de 7%.

Les échantillons de marne ont subi une consolidation plus élevée que celles appliquées pour le sol, vu leur profondeur. La valeur moyenne de K_{sat} ($1,65.10^{-2}$ cm/j) est inférieure à la valeur obtenue pour le sol. La valeur la plus élevée correspond à l'échantillon 6,3-6,35 m-SC2 de texture limono-sableuse avec une conductivité de $2,36.10^{-2}$ cm/j et la conductivité la plus faible correspond à l'échantillon 5-5,1 m-SC1 ayant une texture limono-sableuse avec une valeur de $1,88.10^{-3}$ cm/j.

Les échantillons de sable marneux présentent les valeurs de conductivités la plus élevées parmi les faciès meubles de la ZNS, avec une valeur moyenne de $7,06.10^{-2}$ cm/j.

La roche présente une gamme de conductivité hydraulique à saturation très étalée. La valeur maximale observée est de 1,2 cm/j pour l'échantillon trouvé à 16,1-16,2 m-SC2, qui possède une densité de vacuoles importante. Cet échantillon a été passé deux fois pour valider la mesure et on a observé une deuxième mesure avec une valeur de 9 fois plus faible que la précédente (0,14 cm/j) avec les mêmes conditions expérimentales. La valeur plus faible mesurée est de $8,54.10^{-4}$ cm/j pour l'échantillon 7,45-7,55 m-SC2. Une caractéristique particulière de cet échantillon est le remplacement apparent de la matrice calcaire par des phyllosilicates et l'existence de vacuoles millimétriques (fig. 14-12) et d'une fissure de quelques centimètres de long visible en surface. L'autre face de la carotte présente une surface complètement intacte, sans porosité visible à l'œil nu.

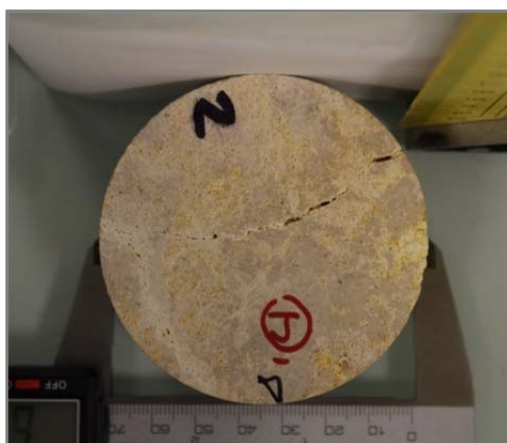
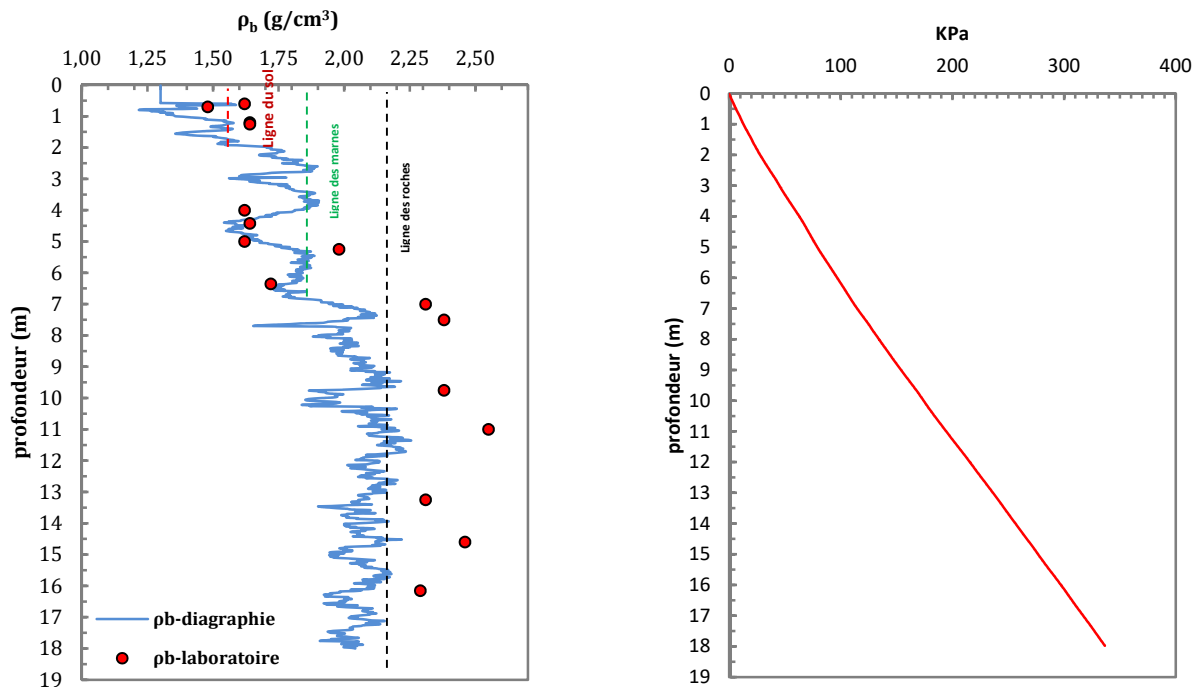


Figure 14- 12 Fissure observée dans la surface de l'échantillon 7,45-7,55 m-SC2.

Les mesures de K_{sat} ont été réalisées en suivant le principe de la loi de Darcy, mais en appliquant une contrainte mécanique proche des conditions de terrain. La valeur de la contrainte mécanique, σ_c pour chaque essai, est présentée dans le tableau 14-7. Ces valeurs ont été calculées à une profondeur donnée à partir de la masse volumique apparente des matériaux sus-jacents de la ZNS. Celle-ci a été mesurée à l'aide d'un outil de diagraphie.

Les données de diagraphie de densité sont cohérentes avec la description lithologique des faciès de la ZNS (fig. 14-13-a ; §12.4.1). Dans les premiers 7 m de la ZNS, on observe

une augmentation assez erratique de la masse volumique apparente due à l'hétérogénéité des faciès meubles (sol, marnes, sables).



a. Diagraphie *density* de la ZNS à Villamblain
b. Résultats du gradient lithostatique de la ZNS à Villamblain
Figure 14- 13 (a) Profil de masse volumique apparente et (b) gradient de pression lithostatique moyen de la ZNS à Villamblain.

A partir de 7 m de profondeur jusqu'à la nappe (environ 18 m), on observe une valeur de masse volumique plus ou moins constante (ligne des roches), qui correspond bien à la formation de roche dure observée lors de la description lithologique des faciès. Vers 18 m de profondeur, on observe une légère diminution de la masse volumique apparente de la formation liée à la présence de la nappe. L'hétérogénéité des faciès meubles fait que le gradient lithostatique (figure 14-13-b) n'est pas linéaire dans les premiers 7 mètres de la ZNS. Au-delà de cette profondeur, le gradient est plus ou moins linéaire jusqu'à la nappe (18,3 m) étant donnée la présence de roches calcaires dures avec des propriétés physiques plus ou moins homogènes.

14.7. Propriétés hydriques des échantillons de sol en conditions non saturées

Cinq échantillons représentatifs du sol ont été prélevés pour caractériser ses propriétés hydriques (rétention en eau et conductivité hydraulique non saturée). Le tableau 14-8 présente une synthèse des conditions expérimentales appliquées à l'aide du système triaxial.

Tableau 14- 8 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de sol brun.

N°	Faciès	Numérotation (prof.)	σ_c (KPa)	# étapes	h_i (cmH ₂ O)	h_r (cmH ₂ O)	Pâte de billes de verre	Pierre poreuse
1	Sol brun	40-45 cm-SC1	5	7	10	600	Oui	Oui
2		45-50 cm-SC1	5	7	20	600	Non	Non
3		60-70 cm-SC2	8	6	20	600	Oui	Non
4		70-80 cm-SC2	10	6	20	800	Non	Oui
5		1,5-1,6 m-SC3	20	8	20	850	Oui	Oui

Pour les premiers essais triaxiaux, l'échantillon était compris entre la pierre poreuse au-dessus (permettant d'homogénéiser l'azote injecté par le haut) et une fine couche de pâte de billes de verre de silice à la base (permettant d'assurer un bon contact entre l'échantillon et la céramique poreuse). Dans certains cas, la pierre poreuse semble impacter la mesure des propriétés hydriques surtout pendant la première étape proche de la saturation. La pâte de billes de verre, par contre, risque d'impacter les propriétés hydriques si la couche est trop épaisse. Pour pallier ces problèmes opérationnels, ces éléments ont été enlevés (tab. 14-8) et les mesures des caractéristiques de chaque élément ont été faites séparément pour corriger ultérieurement les effets éventuels sur la caractérisation hydrique de l'échantillon. Les résultats des propriétés hydriques de la pierre poreuse et de la pâte de billes de verre ont été présentés avant (§14.2 et 14.3).

14.7.1. Données brutes mesurées pendant l'essai

Sur la figure 14-14-a, on observe le volume cumulé obtenu en aval pour chacun des 2 échantillons issus de l'intervalle 40-50 cm-SC1. La courbe de la figure 14-14-b est la succion ($U_a - U_w$) imposée par les CPV-air et le CPV-céramique (fig. 7-1, 8-10). Bien que l'effet d'impédance hydraulique de la pierre poreuse, de la pâte des billes de verre et de la céramique poreuse soit faible, les valeurs de succion ont été corrigées. Sept étapes de succions ont été appliquées pour chaque essai. Pour l'échantillon 45-50 cm-SC1, les valeurs de succion sont 10, 30, 60, 100, 200, 330 et 600 cm. Les valeurs de succion pour l'échantillon 45-50 cm-SC1 sont 20, 60, 100, 150, 220, 330, 600 cm. Le volume cumulé correspondant à l'essai 40-45 cm-SC1 a été corrigé de l'effet d'apport d'eau de la pierre poreuse, des papiers filtres et de la pâte de billes de verre par la soustraction des apports d'eau respectives.

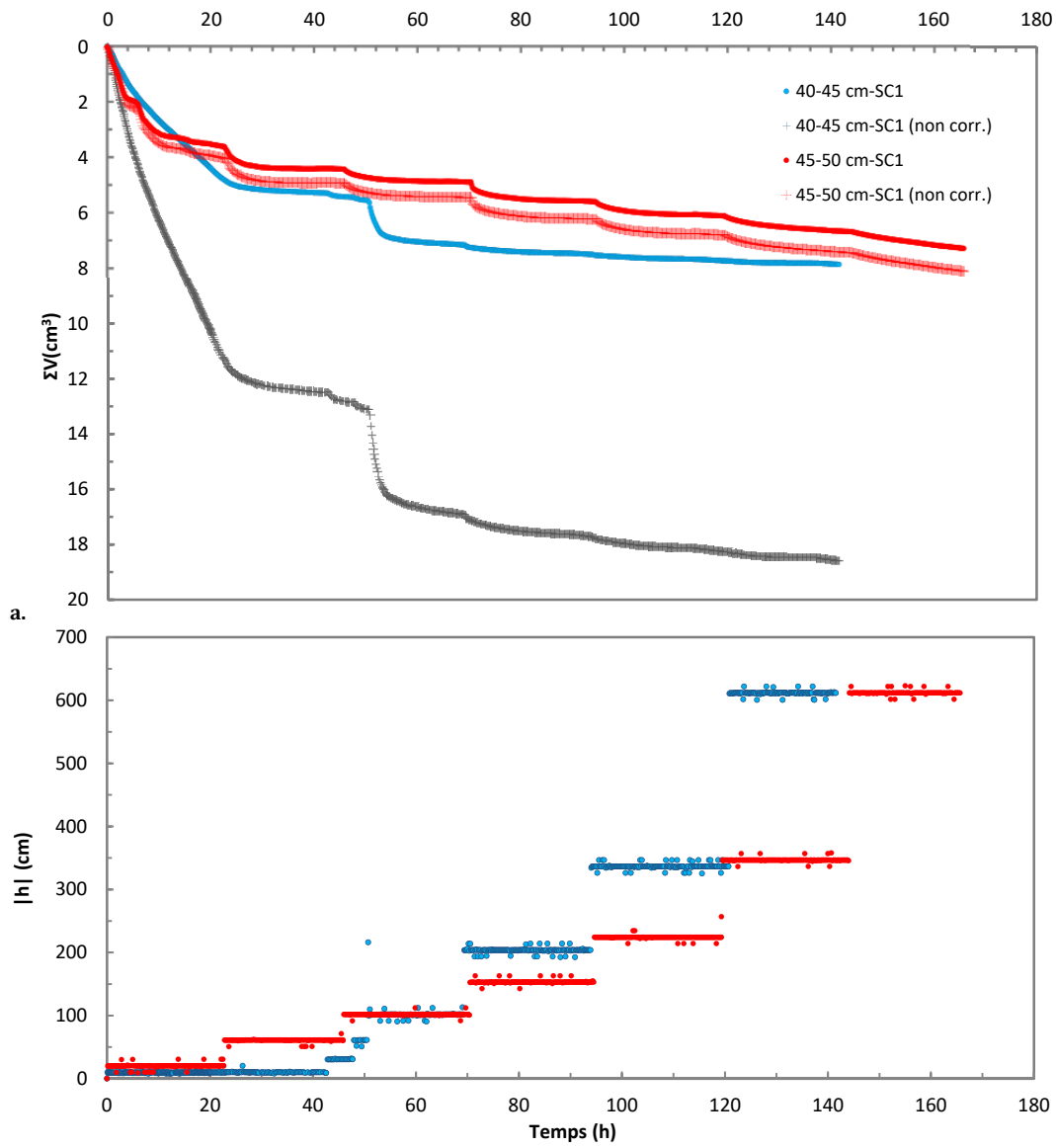


Figure 14- 14 Données brutes enregistrées lors des essais de débit d'extraction réalisés sur deux échantillons de sol brun (40-50 cm-SC1 et 45-50 cm-SC1). a) volume extrait cumulé d'eau corrigé (cercle) et non corrigé (croix) en sortie de la céramique, b) succion imposée corrigée dans l'échantillon.

Les courbes de volume cumulé (fig. 14-14-a) montrent au début de chaque palier une valeur élevée de débit ($\Sigma V/t$) qui correspond à un état hors équilibre hydrique. A la fin de l'étape, le débit diminue et tend vers zéro (critère $<50 \text{ mm}^3/\text{h}$). Le volume cumulé corrigé et la durée de chacun des deux essais sont relativement identiques, $7,87 \text{ cm}^3$ en 142 h pour le premier essai et $7,29 \text{ cm}^3$ en 165 h l'échantillon 45-50 cm-SC1. La courbe bleue non corrigée (premier essai) est caractérisée par une première étape dont le débit est presque constant pendant une majeure partie du temps. Par contre, la courbe rouge ne présente pas cette phase de débit quasi-constant. Cet effet peut être expliqué par la présence de la pierre poreuse qui apporte un volume important lors de la première étape de succion lors de laquelle elle se désature progressivement lors de cette première

étape (fig. 14-4). Une autre particularité observée est la forme de la courbe pendant les dernières étapes. Les différences observées peuvent être associées à l'impédance de la pâte de billes de verre qui peut augmenter fortement si elle se désature pendant ces dernières étapes (fig. 14-7). Dans la figure 14-14, on peut observer les volumes extraits cumulés corrigés pour chaque essai. La différence la plus remarquable est observée pour l'essai 40-45 cm-SC1 (courbes bleues) lors du premier palier de succion. On observe que le débit ($\Sigma V/t$) diminue nettement (pente $\Sigma V/t$ diminue) après d'avoir appliqué la correction de volume. Pour l'essai 45-50 cm-SC1, où la pierre poreuse n'était pas dans le montage (courbes rouges), la différence de débit avec et sans corrections est négligeable.

Le volume d'eau injecté dans la cellule et le volume d'azote sont aussi enregistrés (fig. 14-15), pour ensuite calculer le taux de vides et avoir une idée de la déformation de l'échantillon tout au long de l'essai.

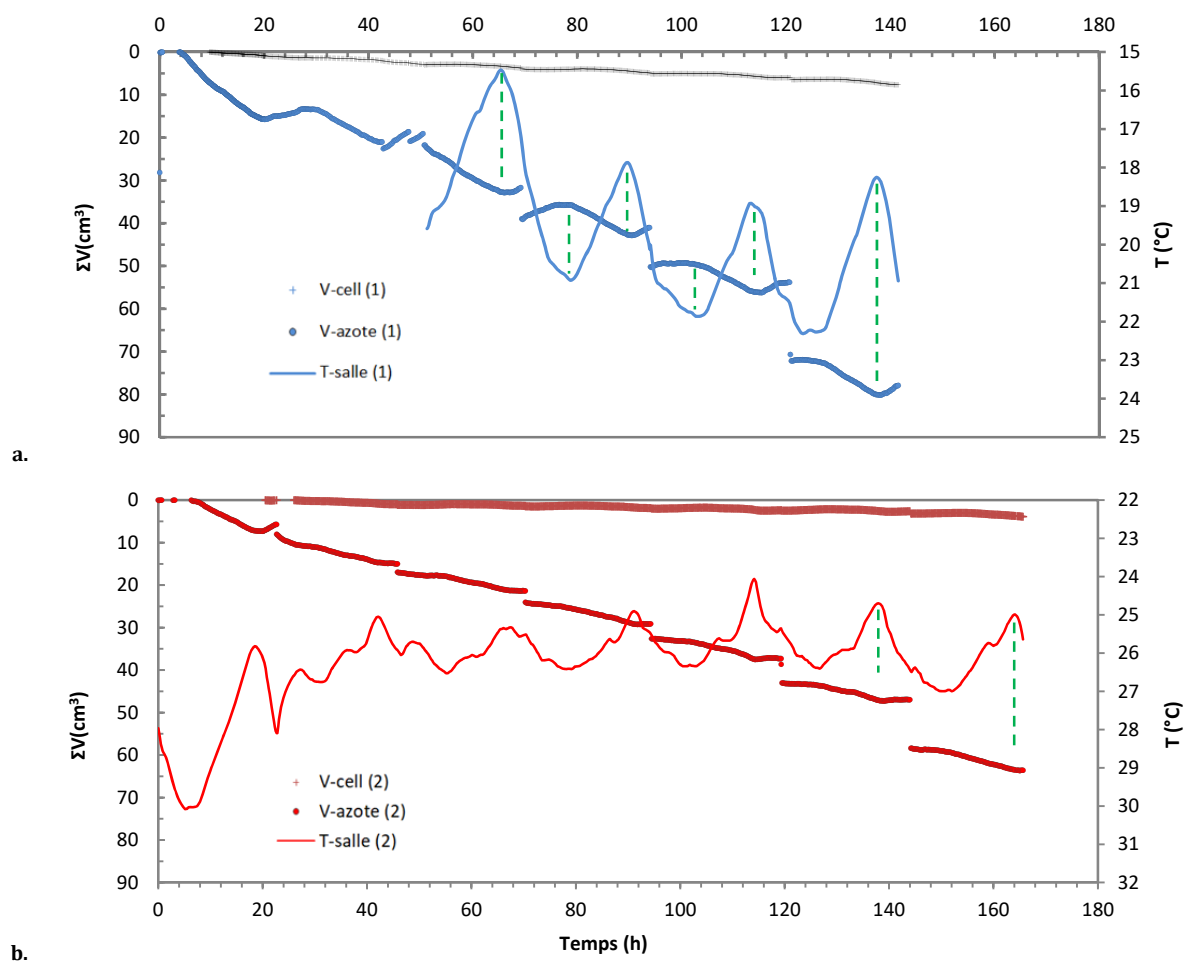
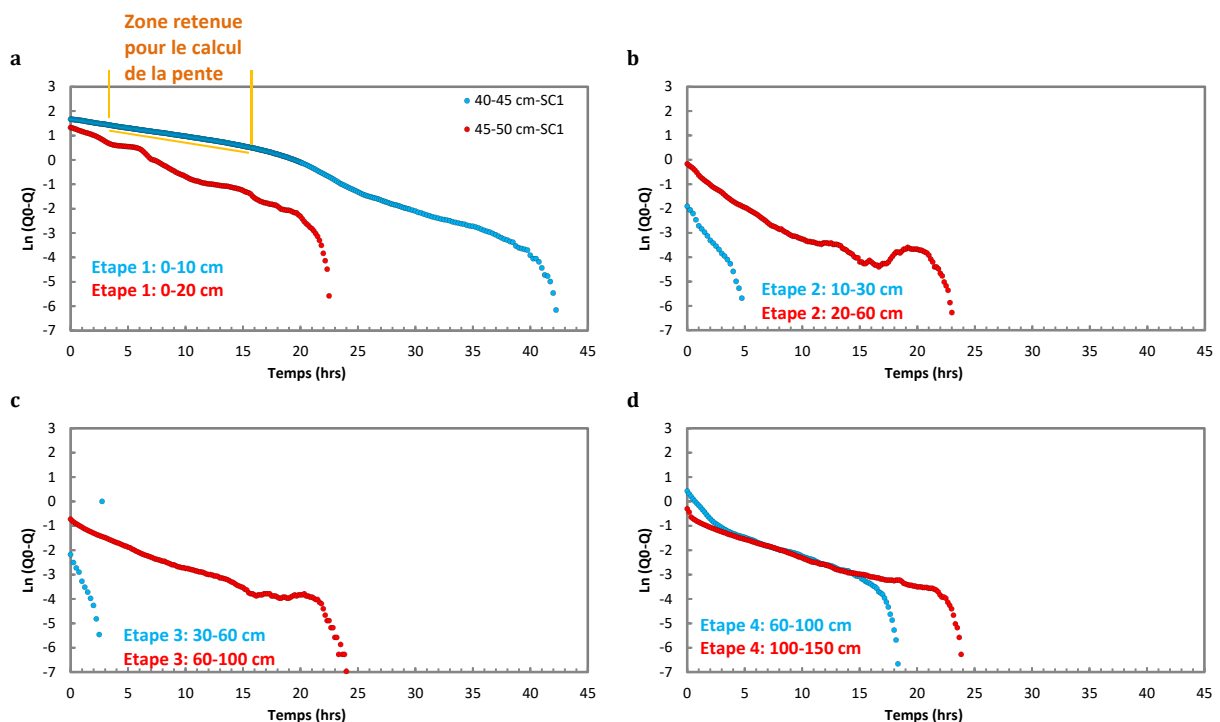


Figure 14- 15 Volume cumulé d'azote dans l'échantillon et d'eau dans la cellule pendant a) l'essai 40-45 cm-SC1 et b) l'essai 45-50 cm-SC1.

Le volume total d'azote injecté dans l'échantillon et d'eau injecté dans la cellule pendant l'essai 40-45 cm-SC1 est de 77,9 cm³ et 7,6 cm³ respectivement. Pour l'essai 45-50 cm-SC1, les volumes sont 63,6 cm³ et 3,9 cm³ respectivement. Le volume d'azote injecté pendant l'essai 1 est supérieur à celui injecté pendant l'essai 2, car il y avait la porosité de la pierre poreuse à remplir, en plus de celle de l'échantillon. La variation de volume dans la cellule, plus faible lors de l'essai 2, est probablement liée à un meilleur dégazage de l'eau. On peut observer également des oscillations pendant le déroulement d'une étape. Les pics de température correspondent avec la position des pics de volume d'azote. Il y a aussi une variation du volume de l'eau dans la cellule, mais elle est imperceptible à cette échelle. Ces variations de volume de fluide sont vraisemblablement plutôt dues aux légères variations de température de la salle plutôt qu'à des réponses de l'échantillon.

14.7.2. Données calculées à l'aide de la méthode de Gardner

Les courbes obtenues par la méthode de Gardner sont présentées dans la figure suivante.



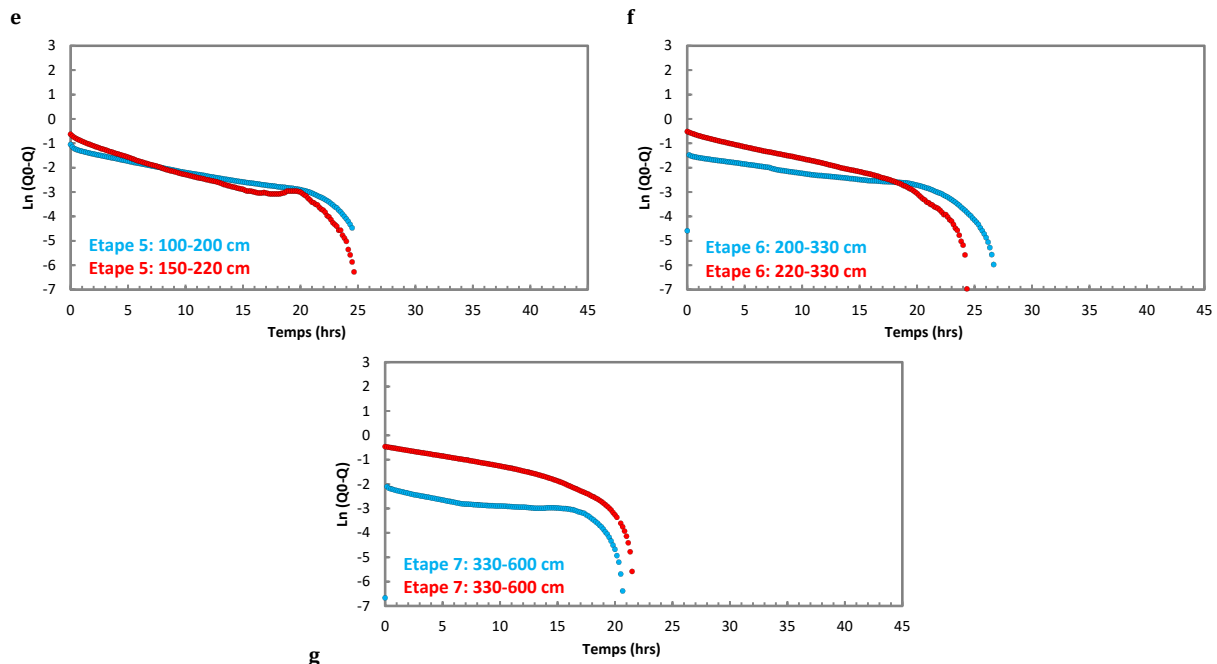


Figure 14-16 Courbes semi-log du volume extrait cumulé (corrigé) par étape en fonction du temps. L'échantillon 45-50 cm-SC1 et l'échantillon 40-45 cm-SC1 appartient au même faciès.

Chaque courbe représente une étape de désaturation de l'échantillon. Dans chaque figure, les deux échantillons sont représentés pour pouvoir observer l'évolution du logarithme du volume cumulé en fonction du temps à chaque incrément de pression.

Le comportement de la courbe est décroissant, car le débit devient plus faible au cours de chaque étape. Dans quelques situations, on observe des oscillations, comme par exemple la bosse vers 20 h dans la figure 14-16-b, qui représente une légère réinjection de l'eau du CPV vers la céramique pour corriger U_w . Il est probable que l'eau à l'intérieur de la céramique ait subi une contraction associée à la variation de température dans la salle (fig. 14-15-b). La partie de la courbe $\text{Ln}(Q_0-Q)=f(t)$ choisie pour le calcul de la pente est l'intervalle le plus linéaire, qui permet d'appliquer la méthode de Gardner (1955).

Un aspect à prendre en compte est l'écart de pression à chaque palier. Des paliers de pression proches empêchent d'obtenir un volume en sortie suffisamment important pour pouvoir faire les calculs de propriétés hydriques (par exemple, courbe bleue - fig. 14-16 b et c). Dans la figure 14-16-c, par exemple, il y a très peu de valeurs de volume cumulé enregistrées après avoir augmenté la succion de 30 à 60 cm. Il aurait fallu appliquer une succion supérieure plus grande, par exemple 80 cm.

Les effets liés à la pierre poreuse et à la pâte de billes de verre cités préalablement sont également observés sur la figure 14-16-a et -g respectivement. On observe une première étape d'environ deux jours pour le premier essai (courbe bleue) et d'un jour pour le second essai (courbe rouge) sans pierre poreuse, ce qui s'explique par le stock d'eau issu de la pierre poreuse. La pâte de billes de verre a probablement joué sur la forme de la courbe bleue dans la figure 14-16-g avec un plateau est observé entre 5 et 15 h tandis que la courbe rouge possède une pente non nulle pendant cette période de temps.

Le tableau suivant présente une synthèse de données correspondant à l'analyse de courbes selon les équations de Gardner.

Tableau 14- 9 Synthèse des résultats après le traitement des données à l'aide des équations de Gardner (intervalle 40 cm-50 cm-SC1). ΣV_{w-i} est le volume cumulé obtenu pour l'étape i, h_i est la succion dans les pores imposée durant l'étape i, θ_i est la teneur en eau à la fin de l'étape i, Σt_i est le temps cumulé à la fin de l'étape i, T est la température d'essai dans la salle, Δt est l'intervalle de temps dans l'étape i choisi pour faire les calculs de la pente B, B est la pente de la courbe calculée avec la méthode de Gardner, $K_{20^\circ C}$ est la conductivité hydraulique corrigée de l'effet de la température.

I.D	Etape	ΣV_{w-i}	h_i (cmH ₂ O)	θ_i (cm ³ /cm ³)	Σt_i (h)	T (C°)	Δt (h)		B (h ⁻¹)	$K_{20^\circ C}$ (cm/j)	Log(K)
							t_i	t_r			
40-45 cm-SC1	1	5,30	9,26	0,404	43	18,11	0	15	-0,07	1,31E-01	-
	2	5,44	29,68	0,403	48	19,39	0	3	-0,65	1,00E-02	-2,00
	3	5,56	56,97	0,402	50	18,38	0	2	-1,02	6,52E-03	-2,19
	4	7,17	102,46	0,388	69	14,40	5	15	-0,16	8,59E-03	-
	5	7,52	204,52	0,385	94	18,17	5	15	-0,09	5,06E-04	-3,30
	6	7,74	338,45	0,383	121	19,21	2	10	-0,07	1,55E-04	-3,81
	7	7,87	611,54	0,382	142	18,73	8	15	-0,02	1,26E-05	-4,90
45-50 cm-SC1	1	3,77	19,81	0,395	23	28,20	0	18	-0,18	8,84E-02	-1,05
	2	4,62	60,51	0,387	46	26,22	1	12	-0,27	5,37E-02	-1,27
	3	5,10	101,53	0,383	70	25,92	0	10	-0,20	2,63E-02	-1,58
	4	5,83	152,87	0,376	94	25,86	5	10	-0,15	1,53E-02	-1,81
	5	6,37	223,59	0,371	119	25,62	5	15	-0,13	9,82E-03	-2,01
	6	6,96	346,11	0,365	144	25,78	0	15	-0,10	5,61E-03	-2,25
	7	7,59	609,90	0,359	166	26,26	0	10	-0,08	2,59E-03	-2,59

La pierre poreuse et de la pâte de billes de verre ont apparemment un effet sur les propriétés hydriques de l'échantillon de l'intervalle 40-50 cm-SC1, notamment sur la conductivité hydraulique à l'état non saturé (fig. 14-17), malgré les corrections des effets.

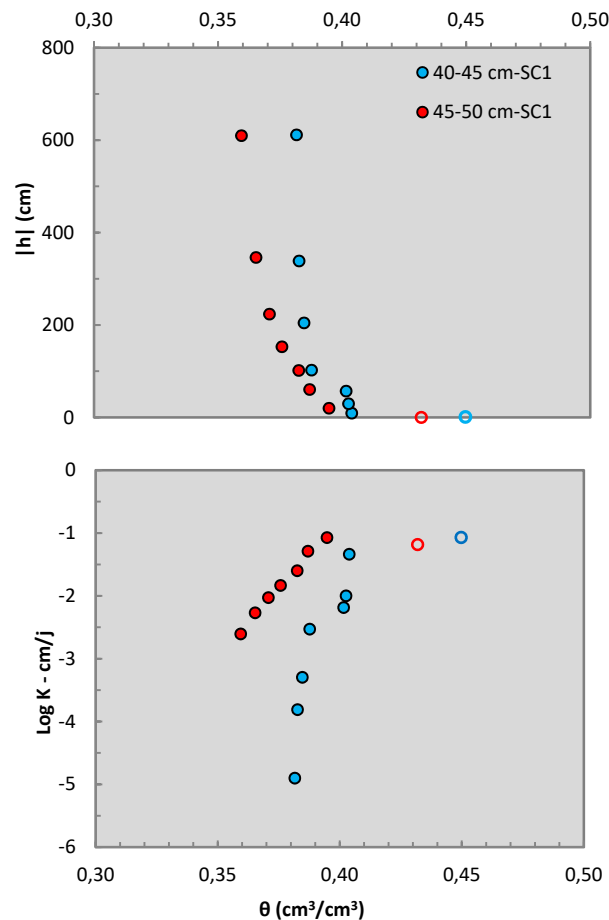


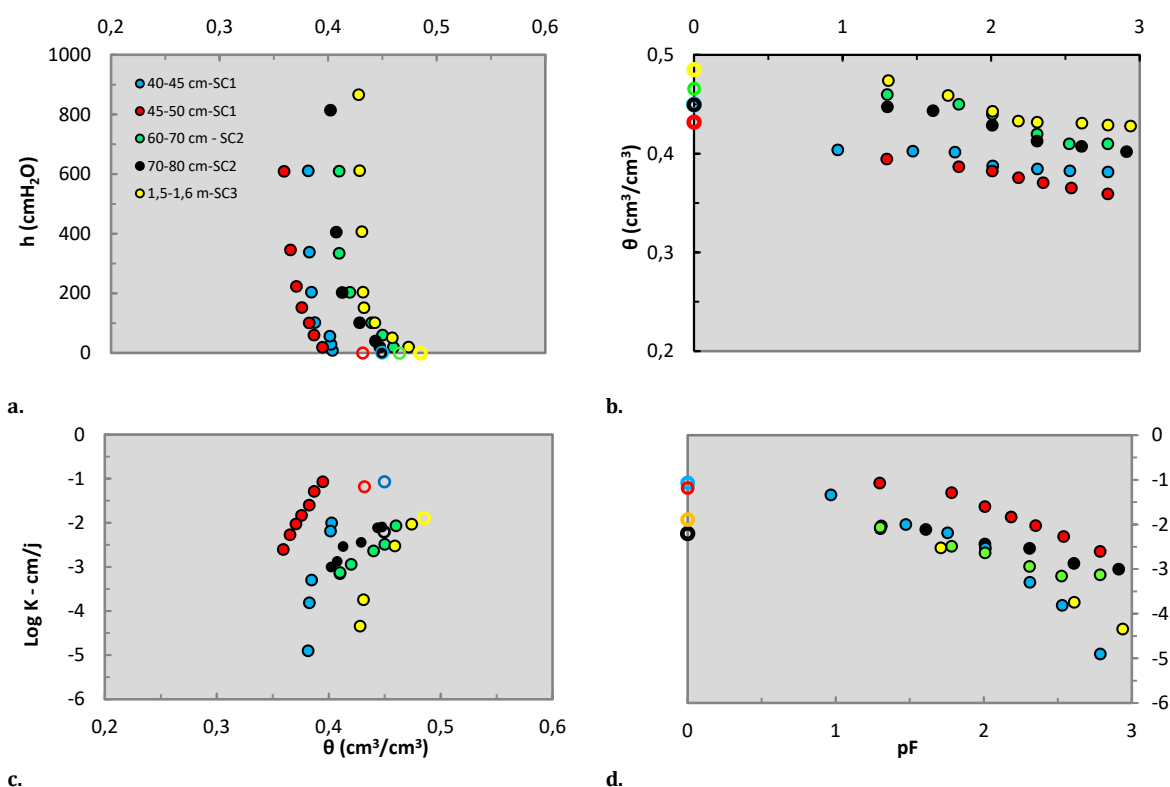
Figure 14- 17 Comparaison des échantillons de sols prélevés dans l'intervalle 40-50 cm-SC1 pour observer l'effet des accessoires pendant l'essai multistep (symboles vides= état saturé).

Dans les courbes de conductivité hydraulique et de rétention en eau (fig. 14-17), on observe une première différence entre les échantillons pour l'état de saturation. L'échantillon 45-50 cm-SC1 a une teneur en eau à saturation un peu inférieure à celle de l'échantillon 40-45 cm-SC1. Pour un potentiel matriciel inférieur à -100 cm, les courbes de rétention commencent à se différencier. Il est possible que l'impédance créée par la couche de la pâte de billes de verre soit à l'origine d'une telle différence, car la désaturation de cette couche peut limiter celle de l'échantillon. Cet effet n'est pas négligeable si l'épaisseur de billes de verre est importante (3 mm ou plus). Les billes de verre engendrent aussi une sous-estimation des valeurs de la conductivité hydraulique en conditions non saturée.

La figure 14-18 ci-après présente les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique de tous les échantillons de sol étudiés. On observe des valeurs de rétention relativement élevées. Tous les échantillons ont des valeurs de θ_{sat} dépassant 40 % avec une valeur moyenne de 45,8 %. Les teneurs en eau obtenues en fin d'expérimentation,

déterminées par la pression imposée en fin d'expérimentation (elle-même conditionnée par le PEA de la céramique égale à 1 bar) restent supérieures à 35 %. La perte de teneur en eau observée entre l'état initial et la fin de l'essai varie entre 5 et 7 %.

Pour certains échantillons, les valeurs de K_{sat} (fig. 14-18-c) sont légèrement plus faibles que les valeurs de $K(\theta)$ proche de la saturation. Ce comportement est observé pour les échantillons 45-50 cm-SC1 et 70-80 cm-SC2. La valeur la plus élevée appartient à l'échantillon 40-45 cm-SC1 et la plus faible à l'échantillon à 70-80 cm-SC2. La valeur de K_{sat} de l'échantillon 60-70 cm-SC2 n'est pas disponible à cause d'un problème technique d'enregistrement de données pendant le début de l'essai.



c. d.
Figure 14- 18 Propriétés hydriques des échantillons de sols de la ZNS. Les valeurs à saturation sont représentées par les cercles sans remplissage (sauf celle de l'échantillon 60-70 cm-SC2).

14.7.3. Evolution de la variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés.

Le taux de vides a été également mesuré pour observer l'évolution du volume des échantillons non saturés vis-à-vis de la succion imposée. La figure 14-19 présente les courbes obtenues pour les échantillons choisis comme exemple.

On observe que la variation de e est, en général, plus importante pour des variations de succion matricielle comprises entre 0-100 KPa (sauf pour l'échantillon 70-80 cm-SC2). Après cette gamme de succion, la déformation diminue.

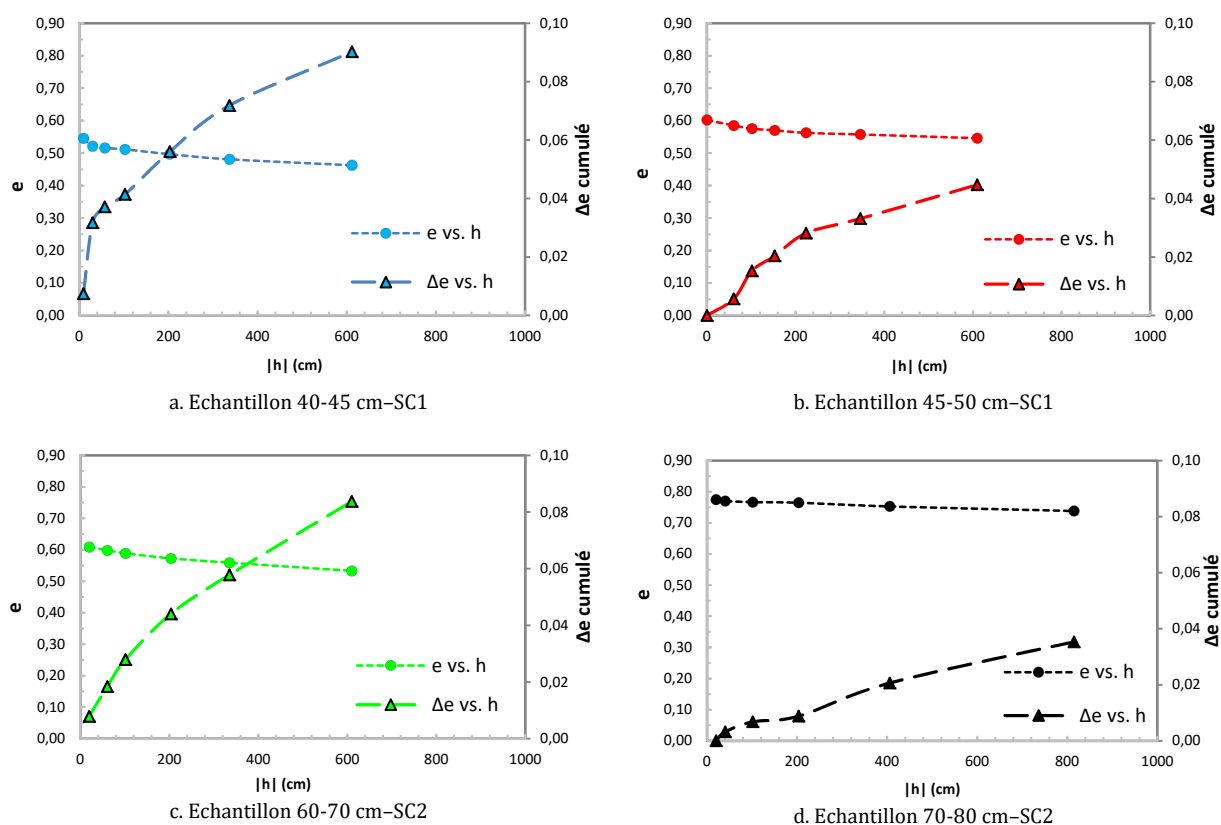


Figure 14-19 Changement d'indice des vides des échantillons lors de leur désaturation

Selon les courbes observées dans la figure 14-19, les échantillons de sol ont subi une diminution d'indice de vides de 5 à 18 %. Dans le cas du sol étudié, la déformation relativement élevée. Cela est lié à sa plasticité, conséquence de la présence de particules de taille argileuse et de la présence de matière organique. Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats de l'indice des vides à la fin de l'essai non saturé.

Tableau 14- 10 Synthèse des résultats de la variation de volume des échantillons de sol de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai, e_r est l'indice de vides à la fin de l'essai, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initial, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai.

Faciès	Numérotation	e_i	e_r	Δe (%)	θ_f ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	σ_c (KPa)
Sol	40-45 cm-SC1	0,55	0,45	18,90	0,38	5
	45-50 cm-SC1	0,61	0,54	12,37	0,36	4
	60-70 cm-SC2	0,62	0,52	16,30	0,41	6
	70-80 cm-SC2	0,78	0,73	5,47	0,40	9
	1,5-1,6 m-SC3	0,66	0,62	5,64	0,39	19

14.8. Propriétés hydriques des échantillons de marne en condition non saturée

Un tableau récapitulatif des conditions expérimentales appliquées à l'étude des propriétés hydriques des échantillons marneux et marno-sableux est présenté ci-dessous.

Tableau 14- 11 Conditions expérimentales des essais de débit d'extraction pour les échantillons de marne.
^ : répétition avec des conditions expérimentales différentes sur le même échantillon.

Faciès	Numérotation (prof.)	σ_c (KPa)	# étapes	h_i (cmH ₂ O)	h_r (cmH ₂ O)	Pâte de billes de verre	Pierre poreuse
Marne	5-5,1 m-SC1	80	7	10	600	Oui	Oui
	1,2-1,25 m-SC2	15	8	10	850	Oui	Oui
	1,25- 1,28 SC2	15	6	10	600	Oui	Non
	4,42-4,6 m-SC2	70	8	20	800	Non	Oui
	6,3-6,35 m-SC2	1	7	20	900	Non	Non
	6,3-6,35 m-SC2 ^	102	7	20	900	Non	Non

14.8.1. Données brutes mesurées pendant l'essai

Les courbes de débit d'extraction et de succion matricielle de deux échantillons représentatifs du faciès marneux sont présentées dans la figure 14-20. Les échantillons montrés ont été prélevés à deux profondeurs différentes dans un même sondage, 1,2-1,25 m-SC2 et 6,3-6,35 m-SC2^ respectivement. La granulométrie des faciès correspondants a été décrite comme limono-sableuse et limoneuse fine, respectivement (tab. 12-2).

L'échantillon 1,2-1,25 m-SC2 montre un drainage plus rapide que l'échantillon 6,3-6,35 m-SC2. Les étapes sont aussi plus courtes pour l'échantillon 1,2-1,25 m-SC2. Entre 20 et 45 h, il y a quatre étapes (30, 60, 90, 150 cm), lors desquelles le drainage est faible et presque négligeable. Il a fallu dépasser 150 cm pour observer de nouveau un écoulement. Ensuite, les deux derniers paliers présentent également un faible drainage. Le volume cumulé obtenu au cours du temps pour l'autre échantillon est plus progressif. Le volume total cumulé est de 4,68 cm³ pour l'échantillon 1,2-1,25 m-SC2 et 5,3 cm³ pour l'échantillon 6,3-6,35 m-SC2^. Ces valeurs sont plus faibles que celles obtenues pour les échantillons de sols qui ont pourtant la même taille.

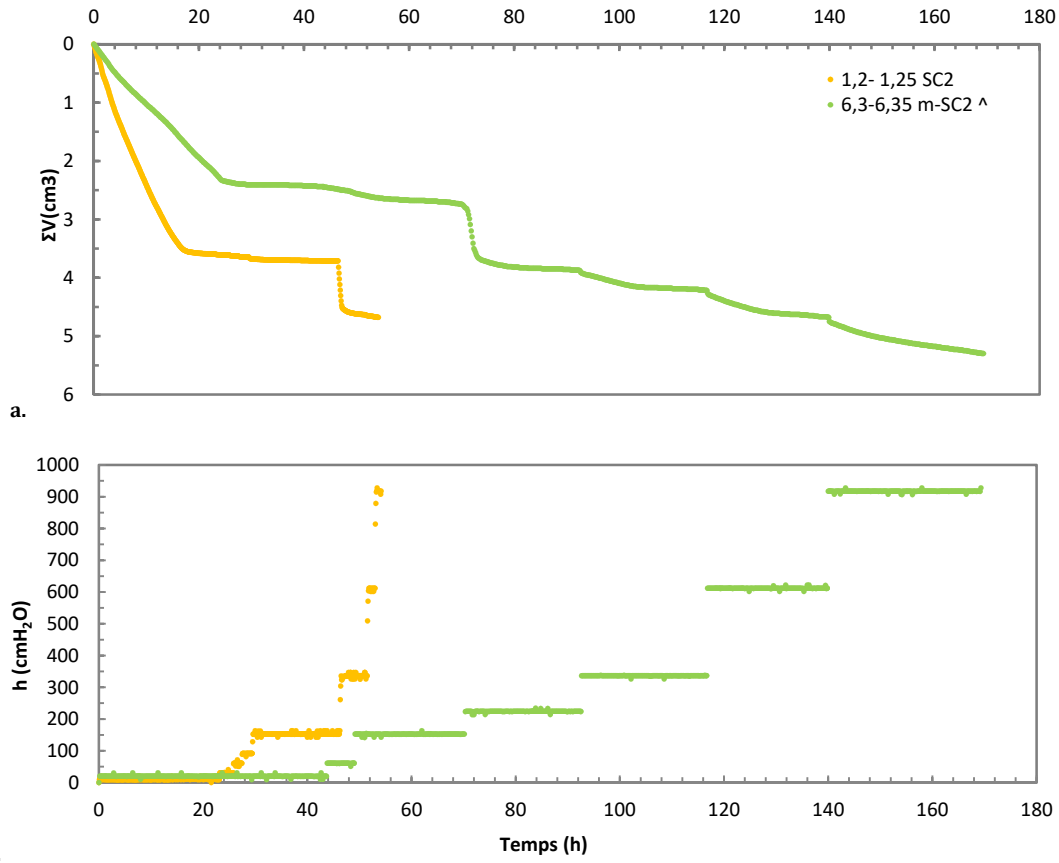
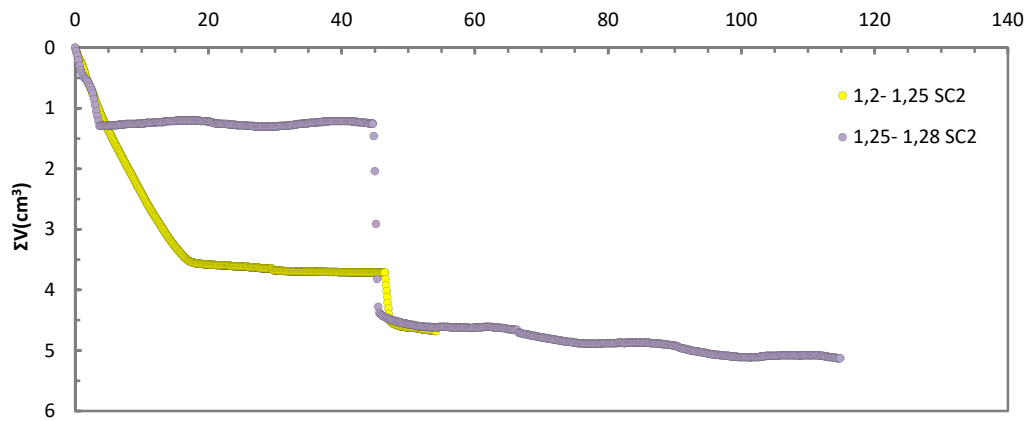


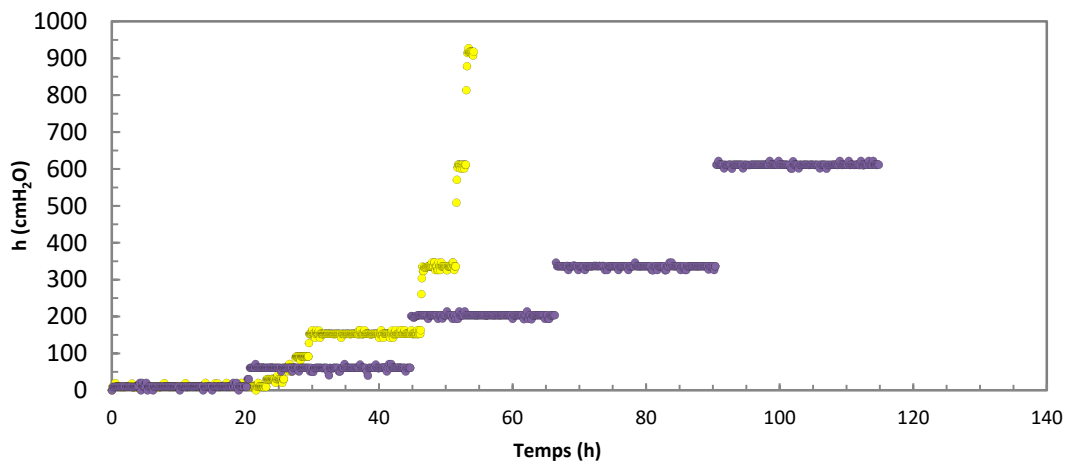
Figure 14- 20 Données brutes enregistrées pendant l'essai *multistep* de deux échantillons de marne. a) volume cumulé d'eau en sortie, b) succion matricielle imposée dans l'échantillon.

Sur la figure 14-21, l'échantillon 1,2-1,25 m-SC2 est comparé à l'échantillon 1,25- 1,28 SC2 du même intervalle et ayant les mêmes caractéristiques physiques, lequel a été passé sans pierre poreuse (tab. 14-11). Lors de la première étape, on observe un arrêt d'écoulement pour l'échantillon 1,25- 1,28 SC2 après 5 heures d'essai. Cette interruption instantanée du débit est associée à l'absence de la pierre poreuse qui raccourcit l'étape 1.

L'effet de la consolidation σ_c a été aussi étudié sur l'échantillon 6,3-6,35 m-SC2 (tab. 14-11). Pour le premier essai, la consolidation a été négligée (1 KPa). Pour le deuxième essai, la contrainte σ_c imposée a été celle proche au terrain (102 KPa) correspondant à une profondeur de 6,3 m. Les deux courbes de volume cumulé sont décalées, mais le volume final est très similaire (5,30 cm³ sans consolidation et 5,29 cm³ avec) (fig. 14-21-a).



a.



b.

Figure 14- 21 Comparaison des échantillons 1,2-1,25 et 1,25-1,28 m-SC2 pour étudier l'effet de la pierre poreuse. a) Volume cumulé, b) Succion imposée dans l'échantillon.

L'effet le plus remarquable est sur la durée de chaque essai. Il a fallu atteindre plus longtemps pour drainer l'eau pendant l'essai en consolidation. La transition de chaque étape de la courbe de volume cumulé est mieux observée pour l'échantillon sans consolidation. Il est possible que, pour certains échantillons ayant une plasticité importante (matériau limoneux, argileux), l'application d'une contrainte σ_c ne soit pas nécessaire, car le matériau se trouve déjà à une masse volumique de terrain. Dans ce cas-là, une consolidation risque de diminuer le volume de vides de l'échantillon et de diminuer le potentiel matriciel au PAE (et augmenter la succion) intrinsèque de l'échantillon.

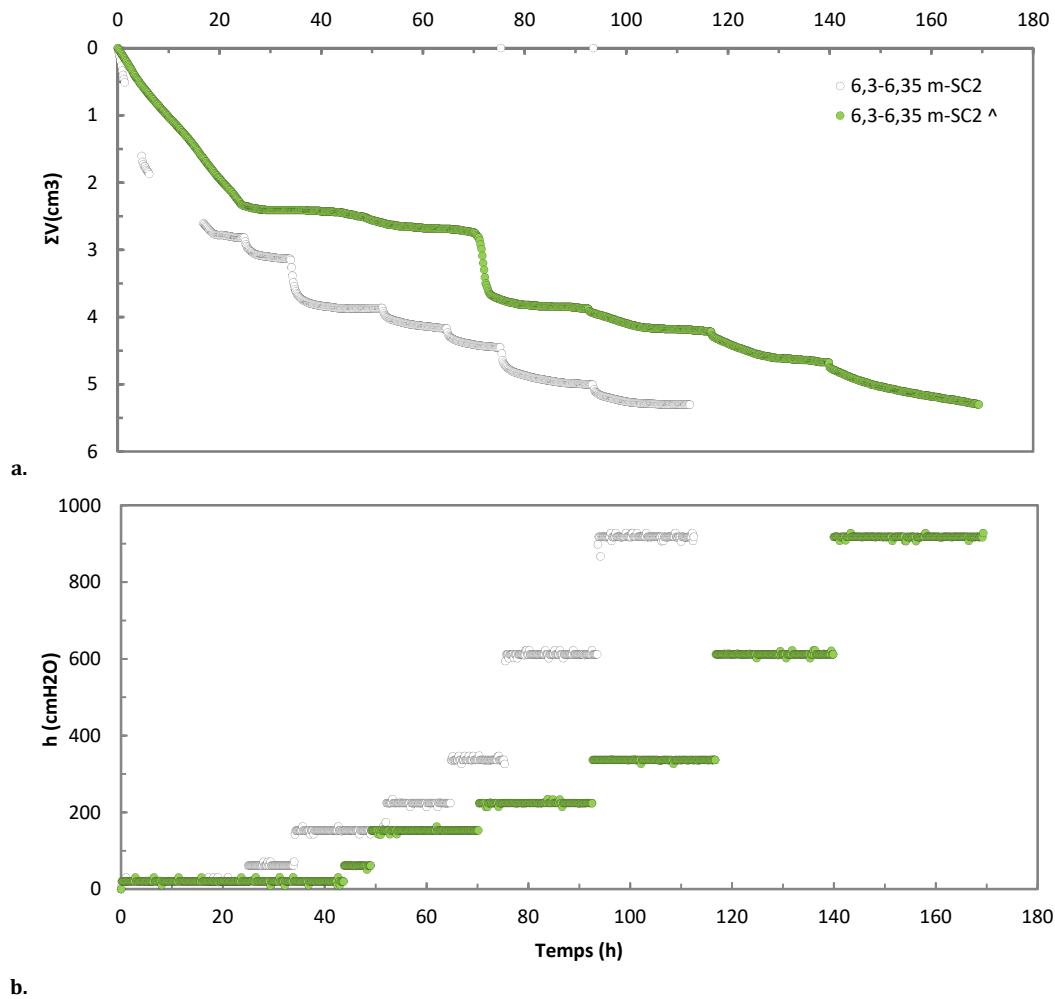


Figure 14- 22 Comparaison du volume cumulé pour deux répétitions d'un même échantillon pour étudier l'effet de la consolidation sur les propriétés hydriques (6,3-6,35 m-SC2). a) Volume cumulé, b) Succion imposée dans l'échantillon.

14.8.2. Conductivités hydrauliques calculées

La gamme de valeurs de teneur en eau observées pour tous les échantillons de marne étudiés va de 25 et 35 % (fig. 14-23). La marne ayant la rétention la plus faible est celle prélevée entre 5 et 5,1 m-SC1. L'échantillon a été décrit lors de l'inspection visuelle comme un sable marneux (fig. 11-8), mais sa granulométrie correspond à une granulométrie limoneuse (tab. 12-2). Les autres échantillons montrent des valeurs de rétention en eau assez proches les unes des autres. Comme pour le cas des sols, certaines valeurs de K_{sat} sont plus faibles que les valeurs mesurées proches de la saturation (échantillon 1,25-1,28 SC2 et 5-5,1 m-SC1).

Les courbes de $K(h)$ sont assez variables, avec une conductivité hydraulique à peu près stable proche de la saturation (sauf pour l'échantillon 1,2-1,25 m-SC2) et ensuite un

$\log(K)$ qui décroît de façon linéaire en fonction du pF (fig. 14-23-d). Les valeurs de K pour les échantillons de marne sont comprises entre 10^{-1} et 10^{-4} cm/j.

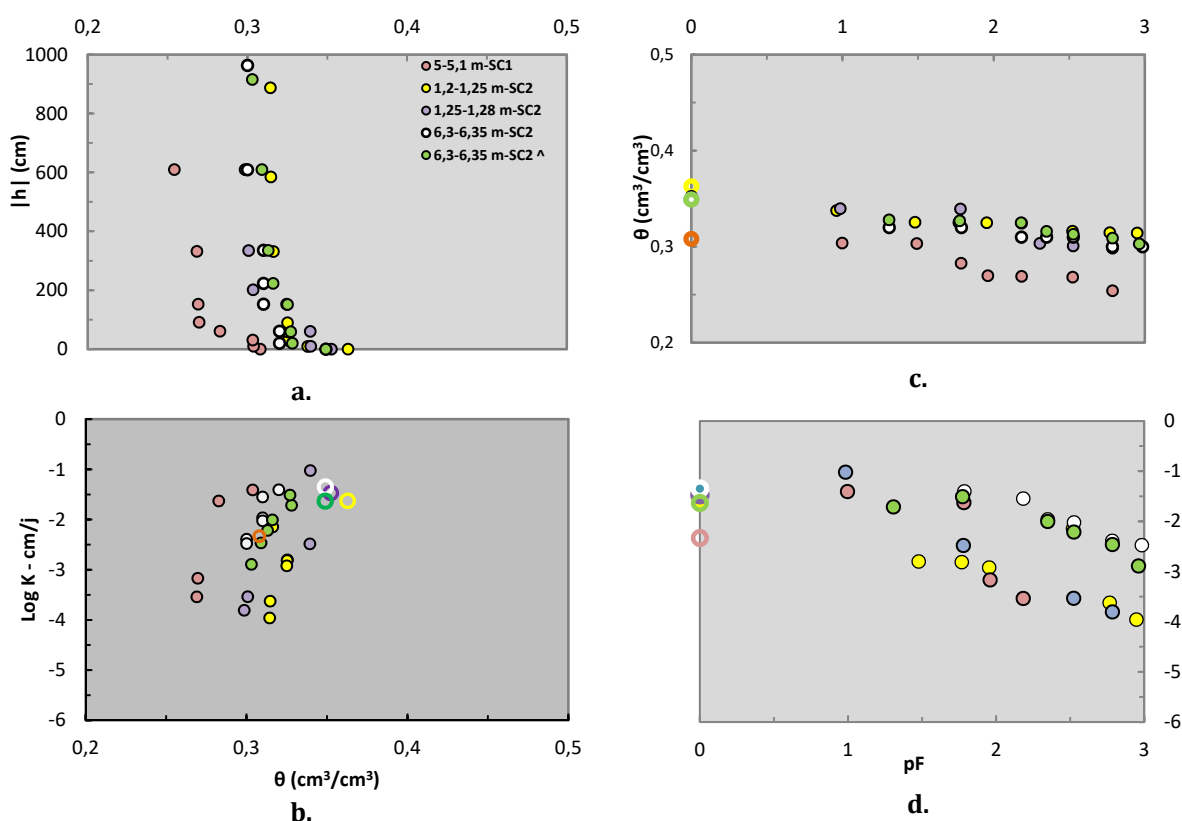


Figure 14- 23 Propriétés hydriques des échantillons de marne de la ZNS. Les valeurs de K_{sat} sont représentées par les cercles sans remplissage.

14.8.3. Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés.

La variation du volume des échantillons de marne (fig. 14-24) suivent la même tendance que celle des échantillons de sols (fig. 14-19). Cependant, la déformation semble moins importante pour les marnes. La valeur moyenne d'indice des vides initiale pour les marnes sont d'environ 55 % (annexe 14-1). Les valeurs de Δe observées se trouvent entre 6 et 14 %. L'échantillon qui a subi la déformation plus importante est celui trouvé le plus en profondeur (6,3-6,35 m-SC2). Cet échantillon possède une texture plus fine que les échantillons 1,2-1,25 m-SC2 et 1,25- 1,28 m SC2 (tab. 12-2).

L'effet de consolidation est observé en comparant les figures 14-24-b et -c. Pour l'essai à $\sigma_c=1$ KPa (6,3-6,35 m-SC2), la variation cumulée de taux de vides Δe est de 11,8 %, tandis que pour l'échantillon consolidé à 102 KPa (6,3-6,35 m-SC2^A), Δe est 14,2 %.

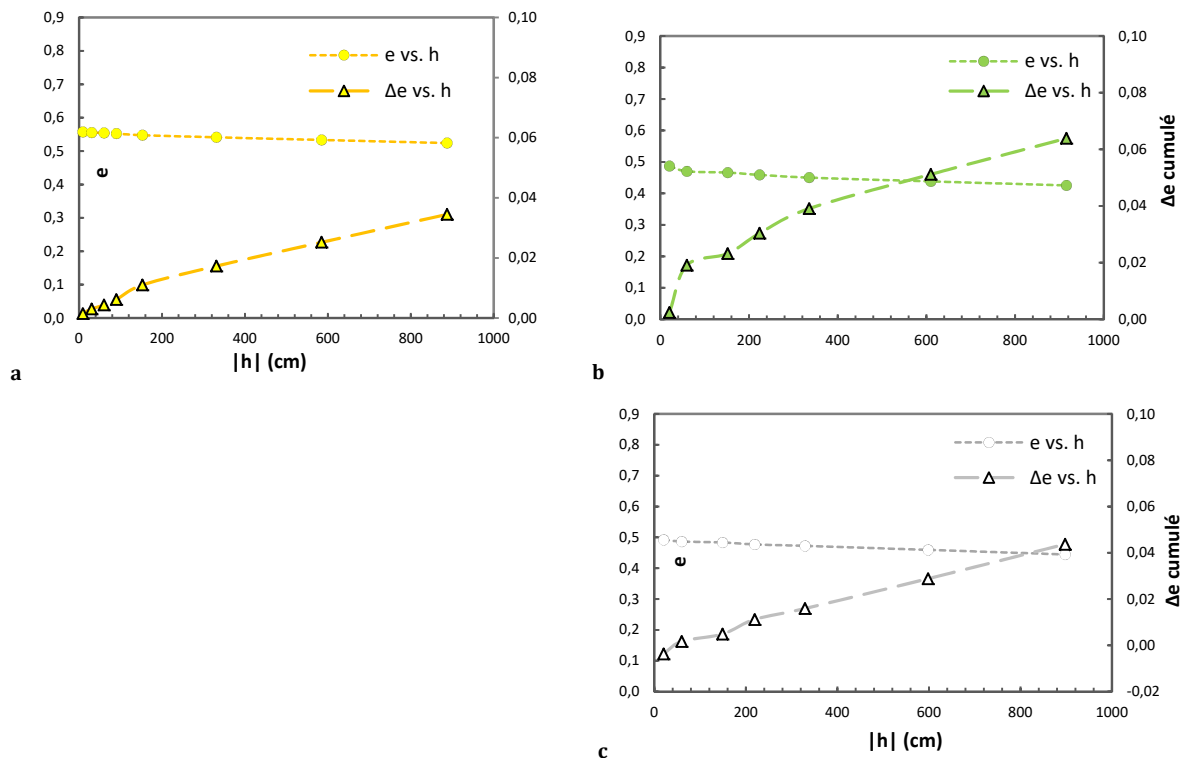


Figure 14- 24 Changement de volume des échantillons de marnes pendant la méthode multistep outflow. a) Echantillon 1,2-1,25 m-SC2, b. Echantillon 6,3-6,35 m-SC2^, c) Echantillon 6,3-6,35 m-SC2.

14.9. Propriétés hydriques des échantillons de sable en condition non saturée

Deux échantillons identifiés comme sableux et sablo-marneux ont été choisis comme exemples. Le tableau 14-12 présente les conditions expérimentales pendant les essais à saturation variable.

Tableau 14- 12 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de sable.

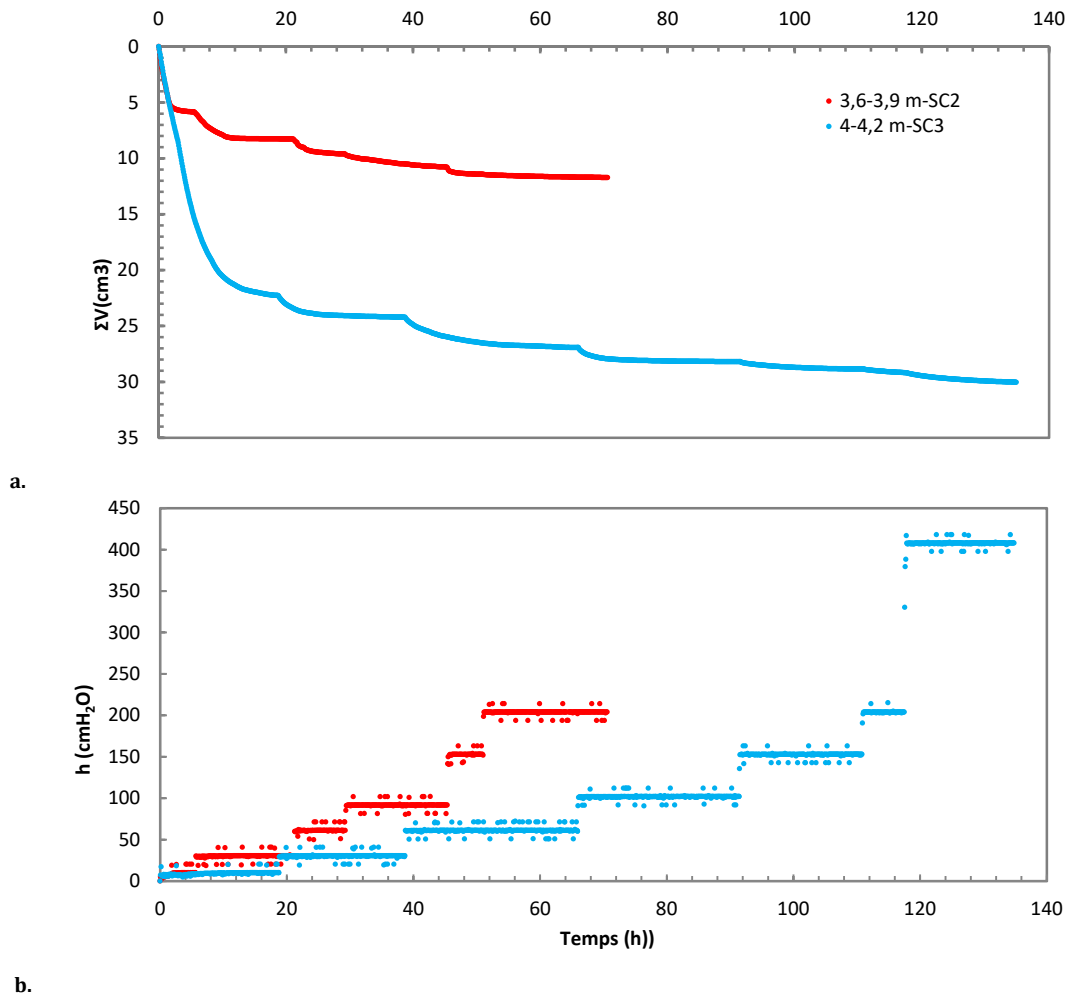
N°	Faciès	Numérotation (prof.)	σ_c (KPa)	nb étapes	h_i (cmH ₂ O)	h_r (cmH ₂ O)	Pate à silice	Pierre poreuse
1	Sable	3,6-3,9 m-SC2	58	6	10	200	Oui	Oui
2		4-4,2 m-SC3	64	7	10	400	Oui	Oui

14.9.1. Données brutes mesurées pendant l'essai

Les courbes de volume cumulé corrigé des échantillons de sable sont cohérentes par rapport aux résultats attendus (fig. 14-25). L'étape contribuant à la plupart du volume extrait est celle la plus proche de la saturation (premier palier). Le débit observé pour les échantillons sableux est relativement élevé par rapport à celui des faciès précédents (fig. 14-14, 14-20).

L'échantillon prélevé à 3,6-3,9 m-SC2 a montré un drainage plus rapide, finalisé au bout de 70 h, tandis que le drainage de l'échantillon de 4-4,2 m-SC3 s'est étendu jusqu'à presque 140 h. Le volume total cumulé obtenu pour l'échantillon 4-4,2 m-SC3 est 2,5 fois

plus grand que celui obtenu pour l'échantillon 3,6-3,9 m-SC2. La principale différence entre ces deux échantillons est la texture, qui est limono-sableuse pour l'échantillon le moins drainant (3,6-3,9 m-SC2) et sableuse pour celui à 4-4,2 m-SC3 (tab. 12-2).



b.
Figure 14- 25 Données brutes enregistrées pendant l'essai du débit d'extraction de deux échantillons de sable. a) volume cumulé d'eau en sortie, b) succion matricielle imposée dans l'échantillon.

Pour les premières trois étapes de l'essai, la pâte de billes de verre n'a pas eu d'effet remarquable sur les courbes de volume d'eau cumulé pour les échantillons de sable étant donné que le volume d'eau recueilli pendant chaque étape est relativement élevé (fig. 14-25-a).

14.9.2. Conductivités hydrauliques calculées

Les données sont représentées par les courbes de θ et K de la figure 14-26. A l'état de saturation, les échantillons de sable possèdent des valeurs de rétention en eau relativement élevées, voire plus élevées que les marnes, mais moins que le sol.

Cependant, la gamme de valeurs observées est plus large que celle des autres faciès. Elle est comprise entre 27 et 38 % pour 3,6-3,9 m-SC2 et 17 et 43 % pour 4-4,2 m-SC3. La courbe de rétention de l'échantillon 3,6-3,9 m-SC2 est similaire à celle obtenue pour l'échantillon de marne 5-5,1 m-SC1 (fig. 14-23), tandis que l'échantillon 4-4,2 m-SC3 a une capacité moins importante de rétention, sauf à saturation. Cette différence est liée au fait que la granulométrie de l'échantillon 3,6-3,9 m-SC2 est limono-sableuse et celle de l'échantillon 4-4,2 m-SC3 est sableuse.

En ce qui concerne $K(\theta)$, le sable montre les valeurs les plus élevées parmi les faciès déjà étudiés, parfois de l'ordre de 2 cm/j pour les valeurs proches de la saturation. Les courbes décroissent graduellement quand la succion dépasse pF 1 (fig. 14-26-d). Les deux échantillons semblent avoir la même diminution de K entre pF 1 et 2 mais avec de teneurs en eau différentes (fig. 14-26-c). La gamme de valeurs de K observée pour ce faciès est comprise entre 2 et 10^{-4} cm/j.

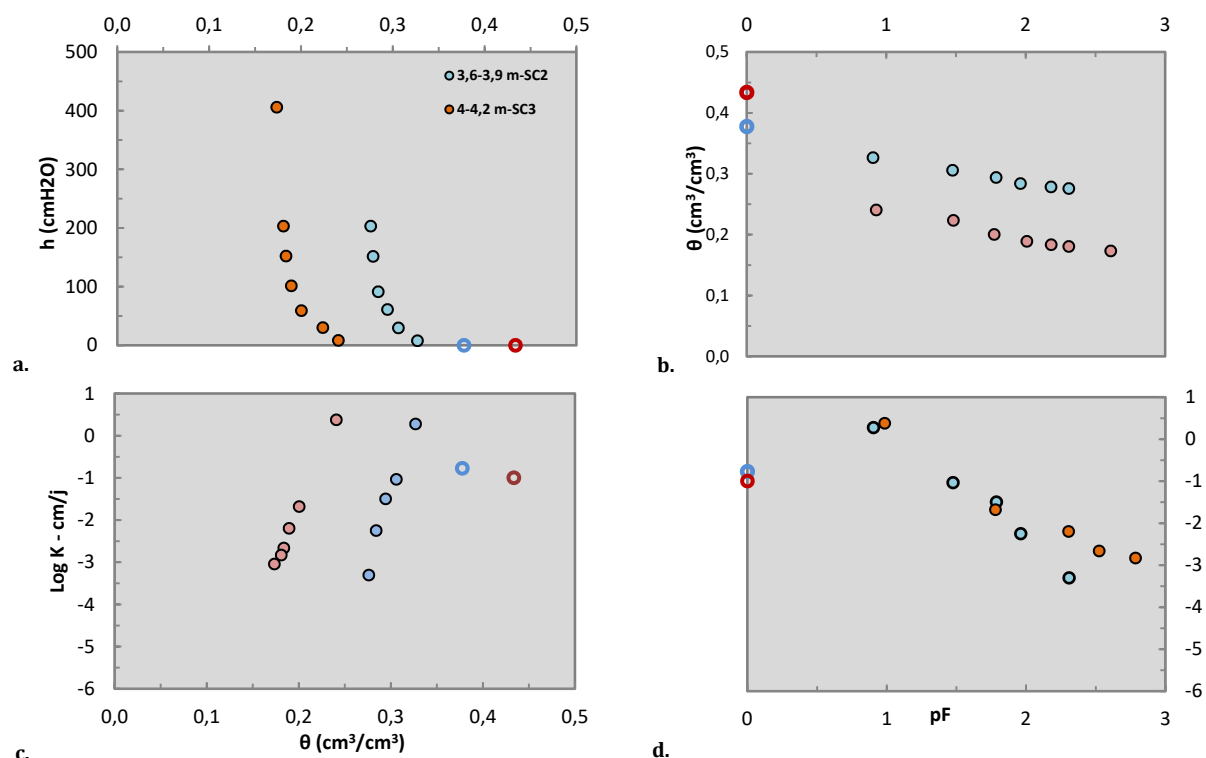


Figure 14- 26 Propriétés hydriques des échantillons de sable de la ZNS. Les valeurs de K_{sat} sont représentées par les cercles sans remplissage.

A nouveau, la valeur de $K(\theta)$ obtenue pour le premier palier est plus grande que le K_{sat} mesuré. Cela a été observé pour les deux échantillons de sable, ainsi que dans certains échantillons de sol et de marne.

14.9.3. Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés

Pour l'échantillon représentatif du sable (4-4,2 m-SC3), la variation d'indice des vides est faible et donc la déformation est presque négligeable (fig. 14-27). L'indice des vides initial pour les échantillons de sable est relativement élevé par rapport aux faciès précédents, avec une valeur moyenne de 70 % (annexe 14-2), caractéristique d'une texture sableuse avec une forte porosité.

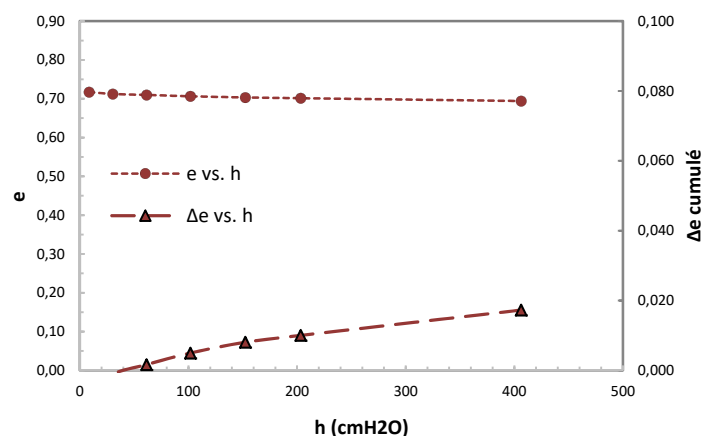


Figure 14- 27 Changement de volume d'un échantillon de sable non saturé (4-4,2 m-SC3)

14.10. Résultats des propriétés hydriques des échantillons de roche en condition non saturée

Le tableau suivant présente les conditions expérimentales appliquées pour la mesure des propriétés hydriques des roches calcaires. Six échantillons intacts ont été étudiés à l'aide du système triaxial avec les conditions suivantes :

Tableau 14- 13 Conditions expérimentales des essais du débit d'extraction pour les échantillons de roches.

N°	Faciès	Numérotation (prof.)	σ_c (KPa)	nb étapes	h_i (cmH ₂ O)	h_r (cmH ₂ O)	Pâte de billes de verre	Pierre poreuse
1	Roche	5,1-5,25 m-SC2	81,8	7	10	600	Oui	Oui
2		6,8-6,9 m-SC2	112	8	10	900	Oui	Non
3		7,45-7,55 m-SC2	124	8	10	900	Non	Oui
4		13,2-13,3 m-SC2	241	7	10	900	Oui	Non
5		14,59-14,68 m-SC2	269,5	8	10	1000	Non	Oui
6		16,1-16,2 m-SC2	300	7	10	800	Non	Oui

14.10.1. Données brutes mesurées pendant l'essai

Les essais de débit d'extraction sur la roche dure ont été faits dans un temps plus court à cause d'une désaturation plus rapide de la roche. La figure 14-28 présente les données acquises pour deux échantillons représentatifs. La plupart des essais n'ont pas duré plus

de 4 jours étant donné que l'équilibre hydrique par étape était inférieure à 24 h. La plus grosse étape observée dans la figure 14-28 est la première, proche à la saturation. On observe que plus de 50 % de la totalité de l'eau drainée a été obtenue pendant la première étape pour les deux échantillons. Cela a été observé pour la plupart des roches étudiées. C'est-à-dire que le potentiel matriciel au point d'entrée d'air (PEA) de la roche est élevé et supérieur à celui appliqué (1ère étape de succion), étant donné le débit obtenu relativement élevé au début de chaque essai.

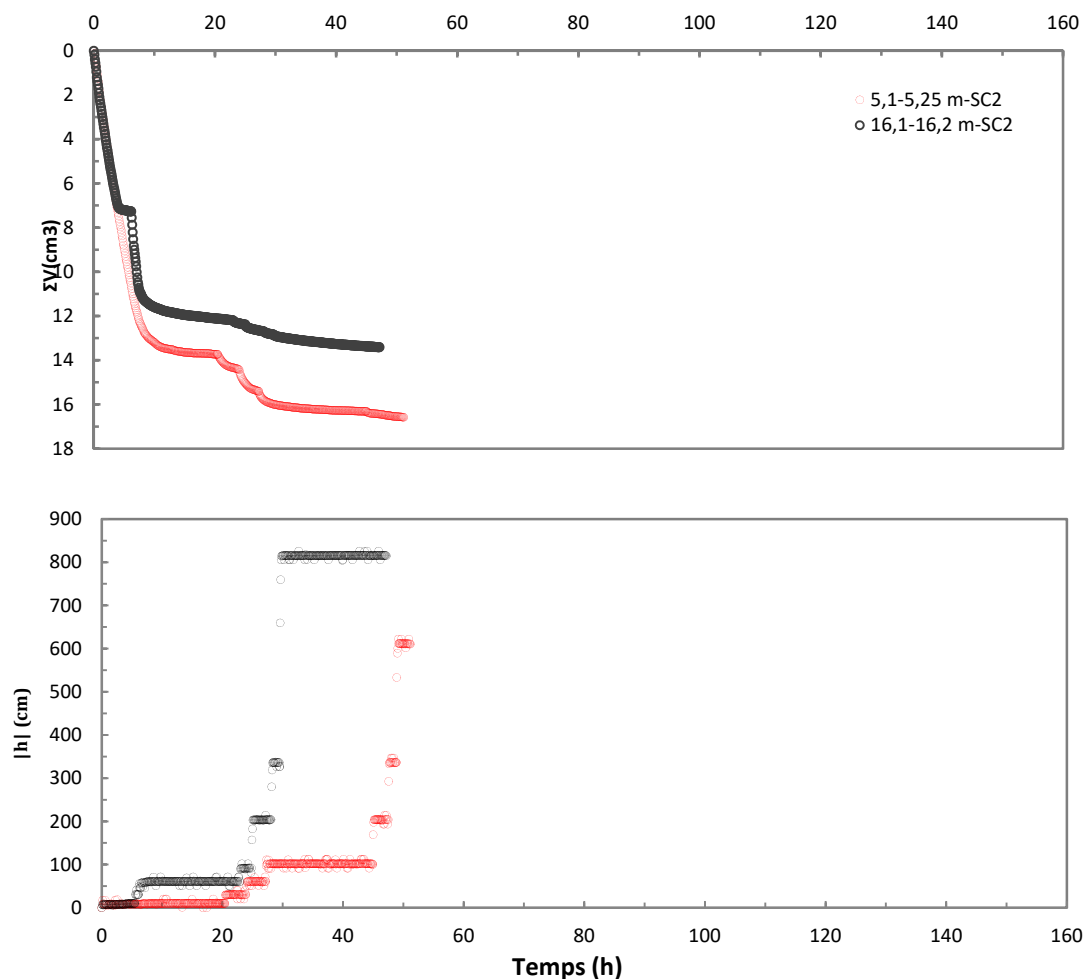


Figure 14- 28 Données brutes enregistrées pendant l'essai du débit d'extraction de deux échantillons de roche calcaire.

Le volume cumulé obtenu pour chaque échantillon est relativement élevé, malgré une roche calcaire dure qui semble peu poreuse à l'œil nu. Les valeurs obtenues pour les deux exemples présentés sont 16,58 cm³ pour l'échantillon 5,1-5,25 m-SC2 et 13,41 cm³ pour l'échantillon 16,1-16,2 m-SC2. Ces volumes sont corrigés de l'effet de la pierre poreuse et de la pâte de billes de verre.

14.10.2. Conductivités hydrauliques calculées

Les valeurs de teneurs en eau observées pour les roches dures sont relativement faibles et se trouvent principalement dans une gamme comprise entre 7% et 16 % (fig. 14-29). Cinq échantillons sur six présentent des valeurs de saturation proche de 16 % et un seul échantillon dépasse cette valeur (5,1-5,25 m-SC2), avec une valeur à saturation d'environ 35 %. Mais, après la première étape, la courbe est similaire aux autres courbes $\theta(h)$.

L'échantillon 7,45-7,55 m-SC2 possède un point d'entrée d'air plus élevé que les autres échantillons de roche. On observe que l'état de saturation ne varie qu'après 300 cm sachant que la succion de départ est de 10 cm (fig. 14-29-a). Aucun changement d'état hydrique n'est observé entre 0 et 300 cm. Après cette dernière valeur, la courbe diminue graduellement jusqu'à 7%. Les échantillons à 6,8-6,9 m-SC2 et 13,2-13,3 m-SC2 n'ont pas présenté de variation importante au cours des différents paliers de pression. Cela donne une courbe presque verticale (fig. 14-29-a).

Concernant les courbes de K (fig. 14-29-d), on observe que certains échantillons conservent une conductivité stable jusqu'à des pF de l'ordre de 1,5-2 (éch. 6,8-6,9 m-SC2, 13,2-13,3 m-SC2, 14,59-14,68 m-SC2), alors que d'autres ont une conductivité qui évolue linéairement sur toute la gamme de pF (éch. 16,1-16,2 m-SC2). La courbe correspondant à l'échantillon 7,45-7,55 m-SC2 (triangles) décrit une ligne quasiment horizontale et donc a une conductivité constante égale à K_{sat} . Les valeurs mesurées de K varient entre 10^{-4} et 1 cm/j.

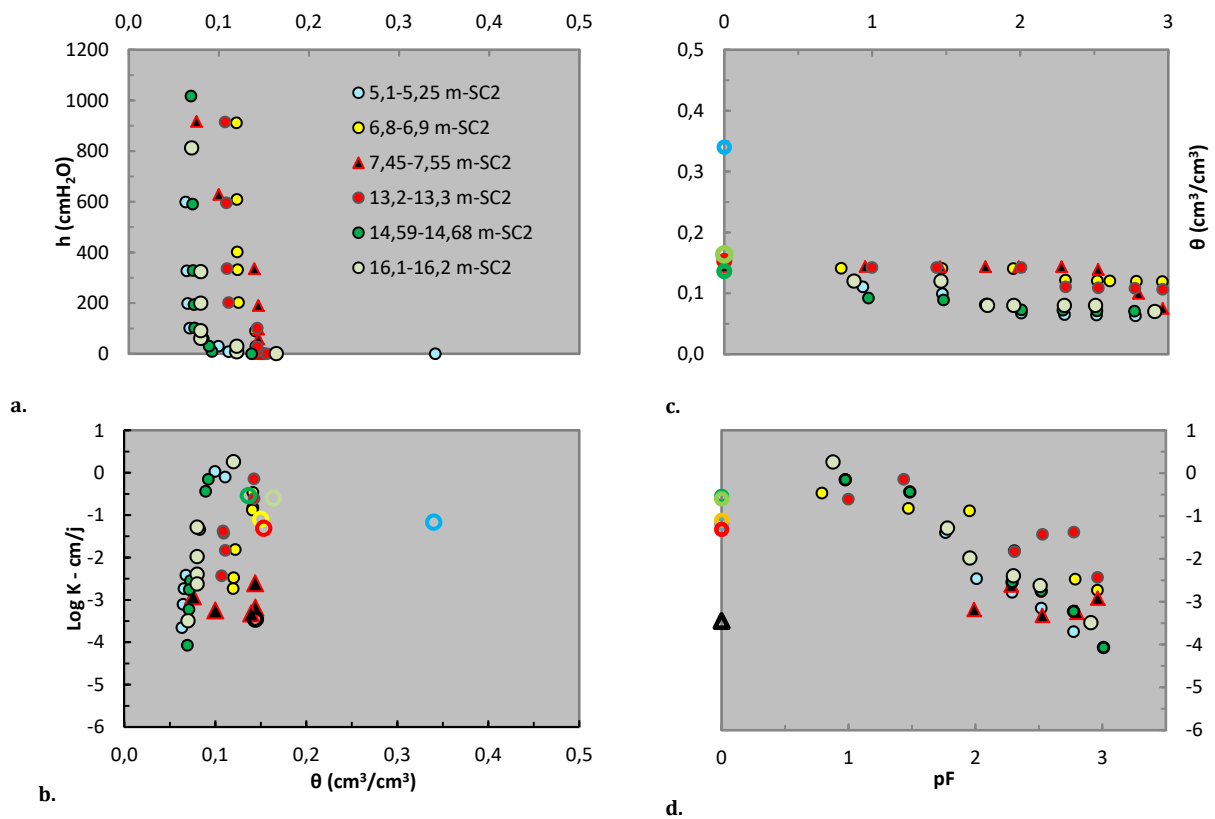


Figure 14- 29 Propriétés hydriques des échantillons de roches de la ZNS. Les valeurs de K_{sat} sont représentées par les cercles sans remplissage.

Pour tous les échantillons de roche dure étudiés, K_{sat} est inférieure aux valeurs de $K(\theta)$ de la première et deuxième étape de succion. Par exemple, on observe pour l'échantillon 5,1-5,25 m-SC2 que $K(h) > K_{\text{sat}}$ jusqu'à pF 2 (fig. 14-29-b). Cela a été observé précédemment pour quelques échantillons meubles de la ZNS.

14.10.3. Variation de volume des échantillons au cours des essais non saturés

L'indice des vides moyen des roches calcaires dures est le plus faible parmi les faciès de la ZNS (annexe 14-3). L'indice de vides initial des roches dures est compris entre 0,08 et 0,17, sauf l'échantillon 5,1-5,25 m-SC2 qui a une valeur de 0,31.

Les calculs de e sont cohérents avec les valeurs de porosité connectée obtenues pour les mêmes échantillons de roche (tab. 12-11). Vu sa dureté, la roche ne subit pas les effets de déformation pendant les paliers de pression appliqués. Il est possible que les valeurs de déformation Δe obtenues (annexe 14-3), soient liées à une légère compression de l'eau de la cellule. La figure 14-30 présente deux exemples des courbes d'indice de vides

et de déformation des échantillons de roches au cours des essais en condition non saturée.

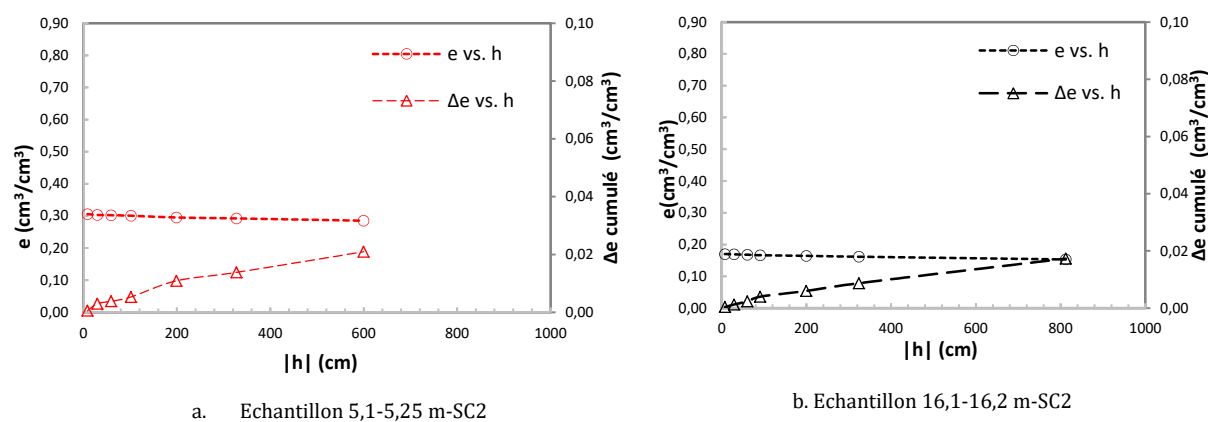


Figure 14-30 Changement de volume des échantillons de roches non saturé.

14.11. Courbes de rétention en eau obtenues par la méthode multistep associées aux courbes obtenues à l'aide du potentiomètre WP4C (pF 0 à 6).

Les résultats préalables à la mesure du potentiel matriciel à l'aide du WP4C sont présentés dans le tableau 14-14. La mesure des valeurs de θ à pF 4,2 (θ_{15}) et séché à l'air (θ_{air}) ont permis d'avoir une gamme de plus précise de teneur en eau permettant d'avoir des valeurs de potentiel entre pF 3 et pF 6.

La rétention la plus élevée appartient aux faciès de type sol ayant des valeurs moyennes de 17 % pour pF 4,2 (15 bar) et 4 % à pF 6 (séché à l'air). Les valeurs moyennes de marne, sable et roche sont assez similaires entre elles (tab. 14-14). Les valeurs les plus basses observées sont celles de l'échantillon de roche 5,1-5,25 m-SC2.

Tableau 14- 14 Valeurs de teneurs en eau pour pF 4,2 et pF 6 calculées pour l'essai avec le WP4C.

Faciès	I.D	ρ_b (g/cm ³)	θ_{15} (pF 4,2)	θ_{air} (pF 6)
Sol	70-80 cm-SC2	1,48	15,16	3,50
	1,4-1,5 m-SC3	1,59	19,54	4,61
	Moy:		17,35	4,06
Marne	1,2-1,3 m-SC1	1,72	8,60	1,76
	5 m - SC1	1,41	12,53	2,84
	1,8 m - SC2	1,72	5,60	1,01
	2 m - SC2	1,72	5,46	0,97
	2,7-2,8 m-SC2	1,64	3,62	0,53
	4,15 m - SC2	1,75	6,84	1,31
	4,5 m - SC2	1,64	7,12	1,41
	6,3-6,35 m-SC2	1,80	5,92	1,26
	Moy:		7,11	1,17
Sable	3,6-3,9 m-SC2	1,62	3,80	0,58
	4,75 m SC2	1,56	5,16	0,94
	4-4,2 m-SC3	1,56	3,80	0,60
	5,3 m - SC2	2,05	7,55	1,42
	Moy:		5,08	0,88
Roche	5,1-5,25 m-SC2	2,05	2,10	0,06
	7,45-7,55 m-SC2	2,38	5,03	0,72
	9,75 m-SC2	2,37	11,13	2,25
	13,2-13,3 m-SC2	2,31	13,87	2,96
	16,1-16,2 m-SC2	2,29	2,74	0,17
	Moy:		6,97	1,23

Les deux échantillons de sols montrés dans la figure 14-31-a présentent des valeurs assez proches en présence d'une succion élevée (pF 3 à 6), avec des valeurs décroissantes de succion entre pF 3 et pF 6. Les résultats obtenus pour les faciès de sol à l'aide du potentiomètre WP4C semblent cohérents par rapport aux données obtenues à l'aide du système triaxial (STx).

Les valeurs de rétention pour les faciès de marne (fig. 14-31-b) sont légèrement inférieures à celles obtenues pour le sol dans la gamme de succion élevée (pF 3 à 6). Pour l'échantillon 5 m-SC1, on observe un décalage de θ (0,27) pour une succion à pF 3,81, par rapport aux données obtenues à l'aide du système triaxial : cette valeur de θ devrait être inférieure à 0,25, d'après les données obtenues par la méthode multistep.

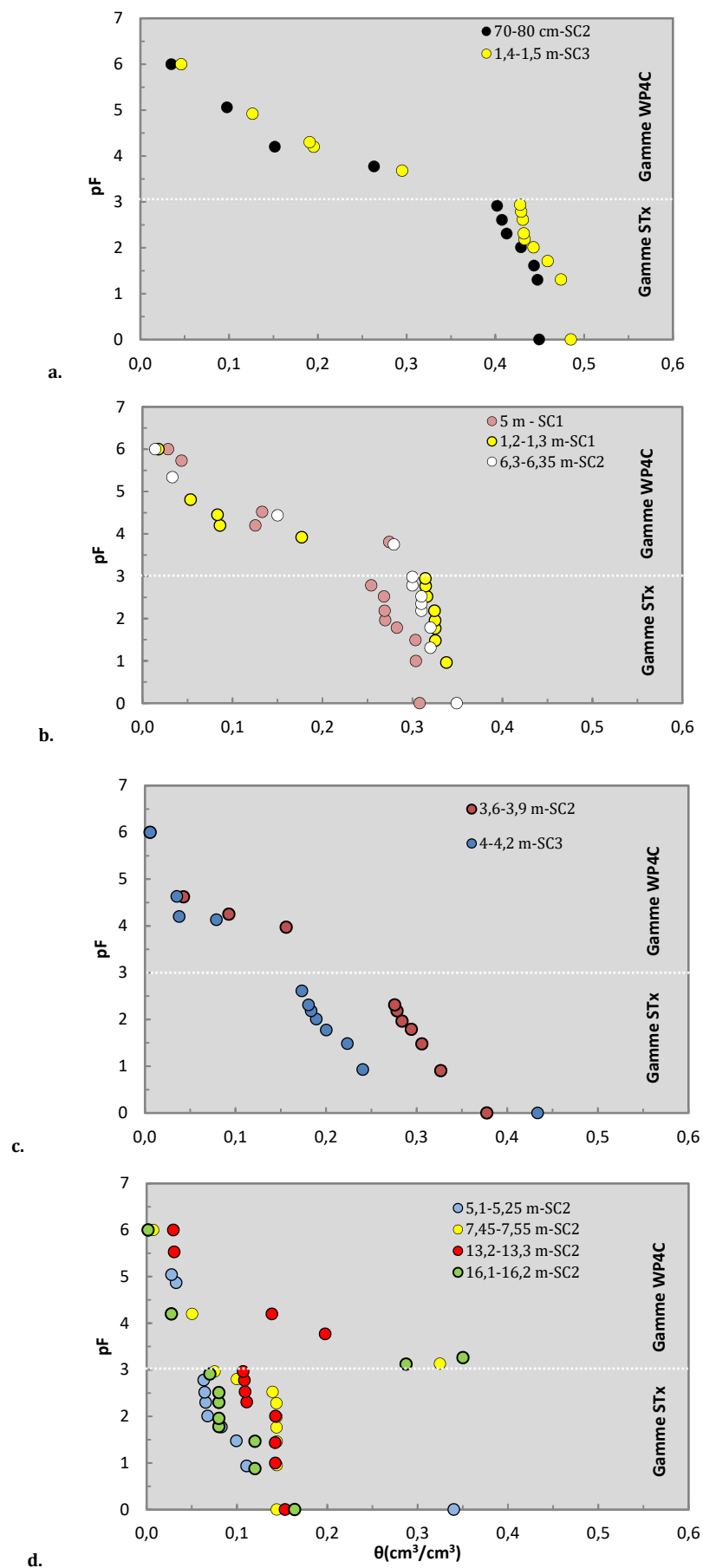


Figure 14- 31 Courbes de rétention en eau pour : a) sol, b) marne, c) sable, d) roche (broyée).

En ce qui concerne les échantillons de sable (fig. 14-31-c), on observe des valeurs de rétention encore plus faibles que pour la marne à succion élevée. Le couplage avec les valeurs obtenues à faible succion paraît cohérent.

Pour le faciès rocheux, les résultats sont peu cohérents pour les valeurs de succion entre pF 3 et pF 4,2. Tous les points correspondant à cette gamme de succion sont complètement décalés par rapport à la courbe de rétention obtenue à l'aide du système triaxial. Cet artéfact peut être lié au fait que les données obtenues à l'aide du WP4C l'ont été sur des échantillons broyés tandis que les données obtenues à l'aide du système triaxial (STx) l'ont été sur des échantillons de roches intacts. La précision du potentiomètre joue aussi sur les mesures entre pF 3 et pF 4 laquelle est estimée à environ 50 % et 5 % respectivement. Au-delà de pF 4, l'incertitude est de l'ordre de 1% (DECAGON, 2012 d'après Bittelli et al., 2012).

14.12. Courbes de rétention en eau avec la presse de Richards (pF 0 à 4,2).

Les données de rétention en eau obtenues avec la presse de Richards (PR) pourront être comparées avec celles obtenues à l'aide du système triaxial (STx) dans la gamme des faibles succions.

Les courbes obtenues par la méthode PR présentent des résultats cohérents par rapport aux valeurs de rétention d'eau mesurées à l'aide du STx (fig. 14-32). On observe que les échantillons de sol possèdent la capacité rétention la plus élevée, ensuite la marne, le sable et finalement la roche.

La gamme de variation de θ des sols et des marnes est plus large pour les mesures PR par rapport aux mesures faites avec le STx (fig. 14-32-a et -b). Par exemple, la courbe correspondant à l'intervalle de sol à 40-50 cm-SC1 [Motte] (fig. 14-32-a) est comprise entre $\theta = 0,53$ et $\theta = 0,36$, soit 17 points de pourcentage, tandis que, pour les échantillons passés au STx, les valeurs varient de 5 à 7 points entre l'état de saturation et la dernière étape de l'essai.

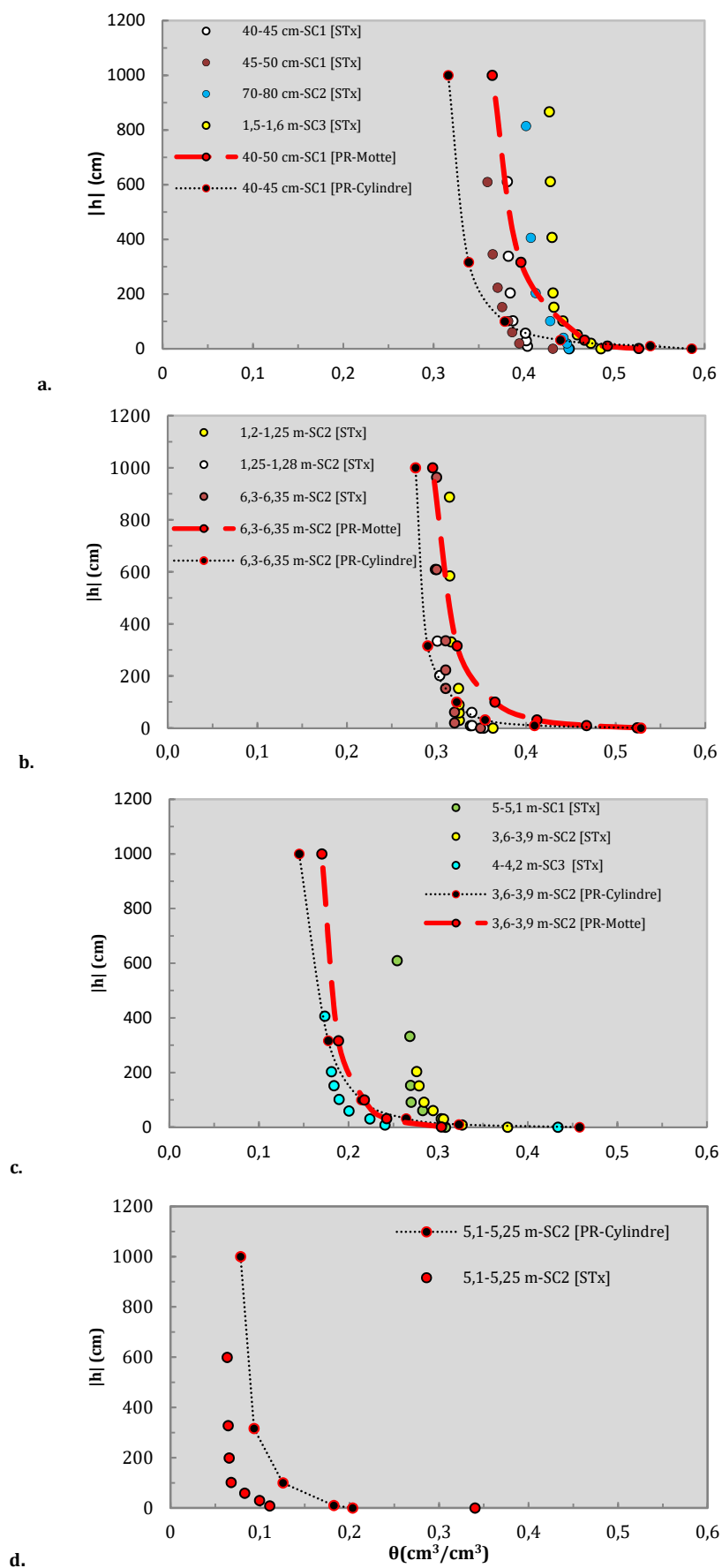


Figure 14- 32 Comparaison des courbes de rétention en eau entre la méthode presse de Richards (PR) et le système triaxial (STx) pour: a) sol, b) marne, c) sable et d) roche.

Une désaturation importante est observée pour l'échantillon 40-45 cm-SC1 [PR-Cylindre], qui varie de 0,58 à 0,32, soit une diminution de la teneur en eau de 26 points de pourcentage. Le temps de drainage dans la presse de Richards est d'au moins 5 jours par cellule (étape), tandis que le temps de drainage par étape avec le système triaxial est compris entre 12 et 48 h. Cette différence dans le protocole pourrait expliquer pourquoi les mesures 40-45 cm-SC1 [PR-Cylindre] et 40-45 cm-SC1 [PR-Motte] montre une perte d'eau plus importante que pour l'échantillon 40-45 cm-SC1 [STx].

Les courbes de rétention des échantillons de marne (fig. 14-32-b) sont très similaires pour de valeurs de teneur en eau inférieures à celle de l'état de saturation (pour $\theta < 0,4$). Il y a une bonne cohérence entre les données obtenues pour une gamme de succion entre 100 et 1000 cm, pour les deux méthodes expérimentales. En revanche, les échantillons de marne montrent un écart important avec la méthode PR par rapport aux valeurs obtenues avec le STx pour les valeurs à saturation. Si on compare les échantillons 6,3-6,35 m-SC2 [PR-Cylindre] et 6,3-6,35 m-SC2 [PR-Motte] avec les échantillons [STx], on observe que les courbes PR possèdent des valeurs de θ_{sat} plus élevées.

Selon Bittelli and Flury (2009), la méthode de la presse de Richards a tendance à surestimer la teneur en eau quand les valeurs de potentiel matriciel sont supérieures à -20 cm. Il a aussi deux raisons liées au protocole expérimental qui peuvent expliquer les valeurs élevées de θ_{sat} avec la méthode de PR. La première raison est le fait que la pâte de kaolin (utilisée pour améliorer la continuité hydraulique) n'est pas retirée à 100 % de l'échantillon et donc au moment du pesage, la masse de l'échantillon peut être surestimée. La deuxième raison est liée au protocole de saturation qui est différent pour la méthode de PR.

Les courbes de rétention des échantillons de sable sont très similaires, sauf pour les échantillons 5-5,1 m-SC1 [STx] et 3,6-3,9 m-SC2 [STx], qui ont drainé très peu d'eau pendant les essais triaxiaux. Les échantillons de sable possèdent la gamme de variation de teneur en eau la plus étalée parmi les faciès de la ZNS. De manière générale, on peut dire que les résultats obtenus pour les faciès de sable avec les deux méthodes sont cohérents.

Pour les faciès de roche, on observe que la courbes de rétention obtenue pour un même échantillon étudié avec la méthode de la presse de Richards (PR) et le système triaxial (STx) sont assez similaires (fig. 14-32-d). On peut constater la capacité de rétention relativement faible de la roche, qui est quasiment désaturée à une succion de 200 cm. Ces valeurs sont cohérentes avec les propriétés physiques observées pour la roche calcaire (faible porosité, faible mouillabilité, matrice riche en carbonates). La mesure à l'aide du STx semble avoir surestimé θ_{sat} par rapport à la mesure PR. Dans le cas des roches, ce résultat était attendu, car la membrane autour de l'échantillon lors de l'essai triaxial permet que les pores qui sont à la surface de l'échantillon (vacuoles, fissures) participent à l'écoulement (s'ils sont connectés) quand l'échantillon quitte l'état saturé. En revanche, lors du montage des échantillons de roche dans la presse de Richards, il n'y a pas de moyen de garder ces pores remplis d'eau et donc ils ne participent pas au drainage pendant la première étape de désaturation.

14.13. Caractéristiques de rétention en eau des échantillons de la ZNS obtenues à l'aide des trois méthodes de mesure (STx, PR, WP4C)

Une dernière comparaison des résultats de $\theta(h)$ entre les trois méthodes de mesure est faite (fig. 14-33). L'association entre les valeurs de θ obtenues à l'aide du potentiomètre WP4C et celles obtenues par les autres deux méthodes STx et PR, pour l'échantillon de sol 40-45 cm-SC1, est cohérente pour des valeurs de succion comprises entre pF 3 et pF 4 (fig. 14-33-a). On observe encore une fois que les valeurs de θ obtenues à l'aide de la méthode PR sont supérieures à celles obtenues à l'aide du STx pour une même gamme de succion. On observe le même type de comportement de données entre les trois méthodes pour des valeurs de pF entre 3 et 4 pour l'échantillon de marne 6,3-6,35 m-SC2 (fig. 14-33-b). Les données de θ obtenues avec la presse de Richards sont, là aussi, supérieures à celles obtenues à l'aide du STx. Mais la courbe de rétention de l'échantillon de marne est, en général, inférieure à celle de l'échantillon de sol. Pour l'échantillon de sable, 3,6-3,9 m-SC2, les valeurs de θ obtenues à l'aide du STx sont cette fois-ci supérieures à celles obtenues à l'aide de la méthode PR (fig. 14-33-c).

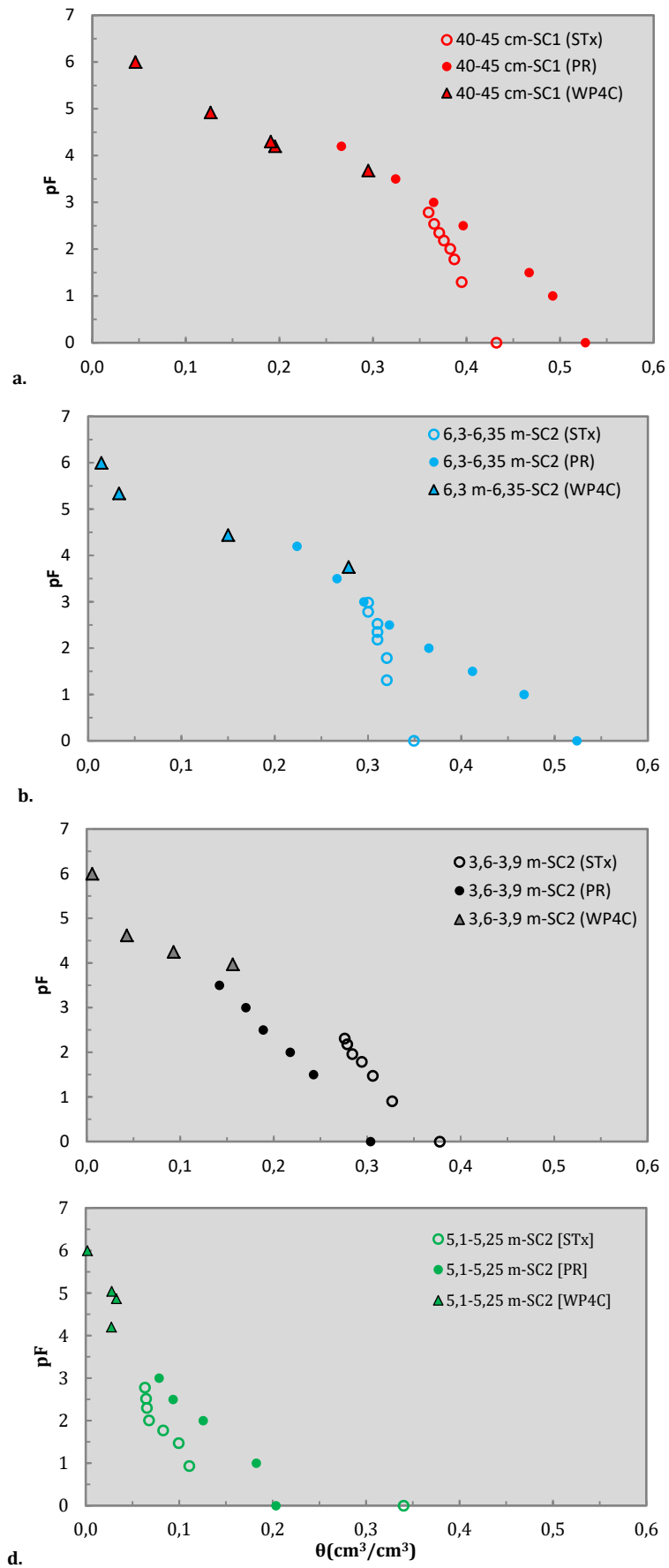


Figure 14- 33 Comparaison des courbes de θ entre les trois méthodes expérimentales. a) Sol, b) marne, c) sable et d) roche.

Le couplage des courbes de θ n'est pas cohérent entre les valeurs obtenues par la méthode PR et la méthode WP4C. Mais la courbe de θ obtenue à l'aide du STx est en accord avec les mesures obtenues à l'aide du WP4C. Les données de θ pour l'échantillon de sable sont les plus faibles par rapport aux autres faciès pour les mêmes valeurs de succion.

Enfin, selon les résultats obtenus à l'aide du dispositif WP4C, la roche possède une teneur en eau proche à 3 % pour des potentiels supérieurs à pF 4,2 (figure 14-33-d). La gamme de teneur en eau au-delà de pF 1 est la plus faible parmi tous les faciès de la ZNS.

PARTIE IV:

SYNTHESE DES RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 15: SYNTHÈSE DES RESULTATS

La caractérisation des matériaux de la ZNS a fait appel à de nombreuses techniques d'analyses physiques et géochimiques pour comprendre la nature de cette structure hydrogéologique complexe. Les analyses quantitatives permettent de compléter les descriptions qualitatives faites au début de la démarche (chap. 11) et de mieux comprendre les propriétés hydriques qui contribuent au transport de l'eau à travers la ZNS.

Vu l'hétérogénéité observée tout le long de la ZNS, il a été nécessaire de simplifier la variabilité des couches sédimentaires afin de pouvoir mettre en relation toutes les propriétés étudiées pour pouvoir ensuite faire des estimations du temps de transfert de l'eau dans la ZNS. Trois groupes lithologiques principaux ont été définis : le sol, la « marne » (rassemblant les différents types de marne et de sable, plus ou moins limoneux ou sableux) et la roche.

La couche superficielle (travaillée) du sol n'a pas été prise en compte dans l'estimation du temps de transfert, car elle subit en permanence des perturbations extérieures dues à l'occupation du sol par les activités agricoles. On part donc de l'horizon intact limono-argileux inférieur. Ce faciès se trouve présent dans les trois sondages carottés. Son épaisseur moyenne est de 60 cm. C'est le seul horizon qui possède une quantité de matière organique non négligeable. Sa plasticité est aussi une caractéristique observée.

La couche lithologique qui se trouve en dessous du sol a été décrite comme une marne calcaire très hétérogène. Cette couche de marne est la plus épaisse de la ZNS parmi les sédiments meubles. On observe des variations de texture tout au long de cet intervalle, avec des intercalations sableuses ou graveleuses. Dans les niveaux les moins profonds (1 à 4 m), ce faciès est friable et peu plastique, avec une gamme de taille de grains qui varie entre particules fines (micromètres) et particules grossières (plusieurs millimètres). Les couches de marne les plus profondes possèdent des particules essentiellement calcaires de taille argileuse qui rendent le matériau plastique. Tout au long de cet intervalle de marne, on observe des intercalations de couches sableuses et sablo-marneuses, parfois avec d'éléments de grande taille (dépassant les 2 cm de diamètre). L'épaisseur moyenne

de la marne est d'environ 5 mètres, comprise entre la base du sol et à la roche calcaire dure. L'hétérogénéité spatiale de cette couche marneuse est notamment liée aux variations de sa texture en fonction de la profondeur. Il est probable que chaque couche corresponde à un épisode de sédimentation différent, d'où la variabilité verticale de la distribution de taille de grains observée. L'altération *in situ* par l'eau a aussi joué un rôle sur l'évolution des propriétés physiques des matériaux après la sédimentation.

Le dernier faciès de ZNS est la roche dure. Son épaisseur est d'environ 11 m, entre la base de la marne (environ 7 m de profondeur) jusqu'à la nappe (environ 18 m de profondeur). Elle a subi des processus des diagenèses, d'où sa dureté. Elle présente des fractures tout au long de l'intervalle non saturé et, à une échelle plus petite, on observe souvent des fissures et des vacuoles. Une altération chimique est aussi observée à certains endroits (surtout là où il y a eu accumulation d'eau). La matrice de la roche semble imperméable à l'œil nu, sauf là où l'on observe des fissures.

15.1. Propriétés physiques et géochimiques des matériaux

15.1.1. Sol

Les analyses de granulométrie des sols ont montré une texture limoneuse, parfois limono-argileuse. Les proportions moyennes de taille de grains sont 50% de particules correspondant au limon, 25% d'argile et 25% de sable et grave. La teneur en carbonates est la plus faible parmi les faciès de la ZNS, environ 15%. La distribution de taille des grains a montré une contribution importante des particules ayant un diamètre équivalent entre 10 et 30 μm de (gamme de limon).

Ces résultats correspondent bien aux analyses de surface spécifique, dont la valeur moyenne est de 39 m^2/g et dont la surface spécifique des micropores (0,7 à 2 nm) est de 18 m^2/g . Ces valeurs relativement élevées peuvent être aussi attribuées à la présence de matière organique (1%), laquelle n'est pas présente dans les autres faciès de la ZNS.

Les valeurs moyennes obtenues de porosité connectée et de porosité totale sont respectivement 45,2% et 40,5%. La porosité connectée est sensée être égale ou inférieure à la porosité connectée. Ce décalage est probablement lié à une surestimation

de la porosité totale lors de l'essai multistep. La distribution de taille des pores obtenue pour les sols est de type bimodale avec une taille moyenne de micropores de 1 μm et une taille moyenne de macropores 686 μm .

Les résultats de la minéralogie des échantillons décarbonatés de sols ont montré la présence de minéraux argileux de type kaolinite, illite et smectite (montmorillonite). Seule la smectite gonfle en présence de phase aqueuse. Les résultats d'adsorption du bleu de méthylène sont cohérents avec la présence de ce type de minéral gonflant.

15.1.2. *Marne et sable*

Les faciès de marne et de sable présentent une forte hétérogénéité, qui peut être observée à travers ses propriétés physiques. Les textures présentes dans ces faciès sont le limon, le limon fin, le limon sableux et le sable (intercalations). La nature des grains de taille sableuse est essentiellement calcaire, selon les analyses des teneurs en carbonate, qui ont montré une teneur moyenne de 91%. Les mesures de teneur en carbonate ont permis de connaître la véritable nature des grains sableux, qui avaient été caractérisés dans un premier temps comme des grains de quartz. La distribution de taille des particules a démontré la présence de différentes tailles de grains dans les faciès de marne (particules limoneuses, particules sableuses fines et, en moindre proportion, particules sableuses grossières. Les intercalations de sable ont montré une distribution multimodale avec trois modes principaux : sable grossier (200 et 1000 μm , ayant la contribution la plus importante), sable fin (vers 70 μm , avec une contribution moins faible), et limon (contribution faible observée dans certains échantillons : 3,9-4 m-SC2 et 5,1-5,17 m-SC1).

Les valeurs de surface spécifiques sont plus faibles que celles obtenues avec les échantillons de sol. La valeur moyenne de surface spécifique totale est de 13 m^2/g , avec une surface spécifique des micropores de 5 m^2/g . Ces valeurs sont cohérentes avec la granulométrie obtenue et avec la très faible présence de smectite et l'abondance de palygorskite. Aucune trace de matière organique n'a été repérée dans les horizons marneux de la ZNS d'après les analyses de teneur en carbone organique.

Les valeurs de porosité connectée et totale sont 35% et 40%, respectivement, ce qui peut s'expliquer par la présence de particules grossières.

Par rapport à la minéralogie du faciès, les minéraux primaires sont la calcite (plus de 90%) et le quartz. Les minéraux secondaires observés sont des phyllosilicates fibreux de type palygorskite et en moindre proportion la montmorillonite. Cela peut expliquer les valeurs d'adsorption de bleu de méthylène plus faibles obtenues pour les marnes (1,2 g_{BM}/g) que pour les sols (4,03 g_{BM}/g).

15.1.3. Roche calcaire

Les porosités connectée et totale de la roche ont été mesurés et comparées pour avoir une idée de la proportion de vides qui participent à l'écoulement. Ces faciès ont une porosité totale et une porosité connectée nettement plus faibles que les faciès sol et marne. Des valeurs relativement plus élevées de porosité connectée ont été obtenues pour des roches qui semblaient peu poreuses lors de leurs inspections visuelles. Les valeurs de porosité connectée varient entre 5 et 22% et les valeurs de porosité totale varient entre 6 et 27%. Les essais de propagation des ondes sur les roches ont confirmé la présence d'une porosité non connectée qui ne participent pas à l'écoulement. Ces types de pores sont notamment des microfissures et des vacuoles de dissolution isolées. A une échelle plus importante (macroscopique), la porosité est due à des fractures de plusieurs centimètres d'épaisseur, lesquelles ont été observées pendant les sondages et lors de la description des faciès.

Au niveau de la matrice (échelle microscopique), c'est à travers la transformation de la calcite qu'on a pu constater l'évolution de la roche et la création d'une porosité secondaire, due au remplacement de la calcite par d'autres minéraux secondaires comme les phyllosilicates notamment de type palygorskite et en moindre proportion de type smectite. Ces transformations ont été particulièrement repérées dans les endroits d'accumulation de l'eau. A une échelle plus importante (macroscopique), les fractures semblent contribuer ou avoir contribué de façon plus importante à l'écoulement gravitaire vers la nappe, ce qui a été confirmé par l'absence de phyllosilicates et la présence d'oxydes de fer dans une très fine couche (quelques microns) qui a précipité ou s'est déposée sur les surfaces exposées de la roche fracturée. Les propriétés

hydriques des roches fracturées n'ont pas été étudiées à l'échelle macroscopique, mais les analyses géochimiques ont montré que les fractures représentent potentiellement un moyen de transport pour les eaux percolant vers la nappe.

15.2. Propriétés hydriques des matériaux

Les propriétés hydriques des échantillons ont été mesurées en conditions saturées et non saturées. Pour les courbes de rétention en eau, plusieurs dispositifs ont été utilisés. Le système triaxial a été utilisé pour mesurer la teneur en eau des échantillons couplée avec celle de leur conductivité hydraulique dans une gamme de potentiel compris entre 0 et -1000 cm. Pour connaître les propriétés de rétention des échantillons à des fortes valeurs de succion (pF 3 à pF 6), le dispositif WP4C a été utilisé. Les courbes de rétention en eau obtenues à l'aide du système triaxial ont été comparées à celles obtenues à l'aide de la presse de Richards pour un potentiel compris entre 0 et -1000 cm.

15.2.1. Sol

En conditions saturées, la valeur moyenne de conductivité hydraulique des couches de sol est de $2 \cdot 10^{-2}$ cm/j. Le sol présente les valeurs les plus faibles de conductivité hydraulique à saturation parmi tous les faciès de la ZNS. La teneur en eau à saturation mesurée est de 46%, la plus élevée parmi tous les faciès. Cette valeur est cohérente avec la teneur élevée en argiles granulométriques et la valeur élevée d'adsorption du bleu.

Pour les essais en conditions non saturées réalisés à l'aide du système triaxial, les échantillons de sol ont montré des valeurs de rétention parmi les plus élevées, comprises entre 45% et 36%, pour des valeurs de potentiel comprises entre -10 et -900 cm. Les résultats obtenus à l'aide de la presse de Richards sont cohérents avec les résultats obtenus à l'aide du système triaxial. La rétention en eau varie entre 55% et 36% pour un potentiel compris entre 0 et -1000 cm. En condition non saturée, les courbes de conductivité hydraulique décroissent très rapidement avec le taux de saturation. Les valeurs de K varient entre 10^{-1} cm/j à saturation et 10^{-5} cm/j pour un état hydrique d'environ -900 cm. Pendant les essais avec le système triaxial, la variation de l'indice de vides des échantillons des sols est quasiment négligeable, et donc la porosité et les propriétés hydriques ne sont pas impactées par ce changement.

15.2.2. *Marne et sable*

La conductivité hydraulique moyenne de la marne, avec ses intercalations de sable, est plus importante que celle obtenues pour les échantillons de sol. Les échantillons de marne limoneuse ont une valeur de conductivité hydraulique à saturation moyenne de $1,65 \cdot 10^{-2}$ cm/j, tandis que la conductivité hydraulique moyenne des échantillons sableux est de $7 \cdot 10^{-2}$ cm/j. Les faibles valeurs de conductivité hydraulique de la marne limoneuse sont liées à la texture du matériau (plus argileuse) et à sa masse volumique apparente élevée liée à la profondeur à laquelle l'échantillon a été prélevé. En revanche, les échantillons de marne sableuse ne sont pas très impactés par la profondeur et donc leur masse volumique apparente est inférieure. La teneur en eau à saturation moyenne des échantillons des marnes est de 35% et celle des échantillons de sable est de 41%.

En conditions non saturées, les échantillons de marne et ses intercalations de sable ont des propriétés hydriques différentes de celles observées pour les échantillons de sol. Les courbes de rétention obtenues pour les marnes limoneuses à l'aide du système triaxial varient entre 36% et 30%, pour une gamme de potentiel comprise entre 0 et -900 cm. Les courbes obtenues avec la presse de Richards varient entre 52% et 29% dans une gamme de potentiel matriciel entre 0 et -1000 cm. Pour les intercalations de sable, les courbes de rétention obtenues à l'aide du système triaxial ont montré une gamme de valeurs de teneur en eau plus large, comprise entre 44% et 17%, tandis que les résultats obtenus à l'aide de la presse de Richards donnent une gamme de teneur en eau comprise entre 46% et 15%. Les valeurs de conductivité hydraulique des marnes limoneuses sont similaires à celles obtenues pour les échantillons de sol, mais avec des valeurs de teneur en eau plus faibles. On a obtenu des valeurs de conductivité hydraulique entre 10^{-1} cm/j à l'état saturé et 10^{-4} cm/j à -1000 cm. Les valeurs de conductivité hydraulique des intercalations de sable sont les plus élevées. K varie entre 2,4 cm/j et 10^{-3} cm/j. On observe que les courbes de conductivité hydraulique pour les marnes et pour les sables décroissent à partir de pF 1. Par rapport à la variation de volume pendant les essais triaxiaux, les échantillons de marne et de sable ont été moins influencés par la consolidation que les échantillons de sol.

15.2.3. *Roche calcaire*

En condition saturée, les échantillons de roches ont montré une gamme de valeurs de conductivité hydraulique à saturation très large, entre 1 cm/j et 10^{-4} cm/j. La roche ayant la valeur la plus élevée (intervalle 16,1-16,2 m-SC2) présente des vacuoles millimétriques, qui sont certainement connectées, mais ne présente pas de fissures visibles à l'œil nu. L'échantillon ayant la conductivité la plus faible présente une fissure millimétrique mais qui n'est visiblement pas connectée. La teneur en eau moyenne à saturation pour les roches est d'environ 15%, sauf un échantillon de roche très altérée proche de la surface (prof. 5 m) dont la teneur en eau à saturation dépasse 30%.

Les résultats obtenus en condition non saturée sont cohérents pour une roche dure, dont l'interaction eau-solide est faible. Les courbes de rétention en eau mesurées à l'aide du système triaxial varient dans une gamme de teneur en eau volumique comprise entre 15% et 5% pour des valeurs de potentiel matriciel comprises entre 0 et -900 cm. Les courbes de rétention obtenues à l'aide de la presse de Richards sont comprises entre 11% et 3% (sauf l'échantillon de l'intervalle altéré 5,1-5,25 m-SC2, dont la valeur dépasse 20% avec la méthode de la presse de Richards). Les roches ayant la gamme de rétention en eau la plus étalée ont montré la présence de minéraux argileux, repérés grâce aux analyses de diffraction aux RX et aux analyses géochimiques. Les mesures réalisées sur des échantillons de roche saine montrent que la quantité d'eau que la roche est capable de stocker est très faible, et les courbes de rétention sont quasiment une ligne droite verticale, car l'échantillon est désaturé à la fin du premier palier de l'essai en condition non saturée.

Les résultats des propriétés de rétention sont cohérents entre les techniques appliquées (système triaxial et presse de Richards). La forme des courbes de rétention en eau reste la même. Pour la conductivité hydraulique, la mesure a été difficile, à cause du faible débit de sortie à partir du deuxième palier. L'échantillon est très rapidement désaturé et, après le deuxième palier de pression, la conductivité hydraulique décroît très rapidement et l'écoulement est quasiment nul. Dans un diagramme de LogK vs. pF, la courbe de conductivité hydraulique des roches diminue très rapidement à partir de -10 cm (pF 1). En moyenne, elle varie entre 3 et 10^{-4} cm/j pour une gamme de potentiel comprise entre -10 et -1000 cm (pF 1 et pF 3).

Les résultats obtenus sur les roches montrent qu'il est nécessaire que la roche soit saturée ou dans un état proche de la saturation pour qu'il existe un écoulement vers la nappe. Sinon, il est possible qu'elle représente une barrière imperméable où l'eau est accumulée jusqu'à ce que le potentiel matriciel soit suffisant pour permettre l'écoulement. En revanche, s'il existe de macrofissures (saturées ou proche de la saturation), il est très probable que l'eau puisse migrer à travers ces endroits où la porosité est très forte, sachant que le seul gradient qui intervient est la gravité. Cet écoulement préférentiel à travers les faciès de roches dures fracturées peut se faire sous la forme de films d'eau circulant à la surface des fissures (Tokunaga et Wan, 1997), ce qui est confirmé par la présence de minéraux déposés ou précipités en fine pellicule sur les faces des fractures.

15.3. Observations au niveau de la transition des faciès meubles et dures

Les zones de transition entre faciès meuble et faciès dur présentent souvent deux caractéristiques : une teneur en eau relativement élevée au niveau du faciès meuble se traduisant par un comportement plastique, notable lors de la description des échantillons (chap. 11) ; des dépôts à la surface des fractures et fissures observées au sein de la roche dure.

Deux hypothèses peuvent être établies pour expliquer l'état de ces deux matériaux: a) une accumulation de l'eau pour les faciès marneux humides et b) une migration de l'eau à travers la roche fracturée, vu les traces d'oxydation observées au niveau des fractures. Lorsque l'eau qui circule verticalement dans le faciès marno-sableux rencontre la roche massive cimentée, il y a un stockage d'eau dû à la faible perméabilité de la roche. On a pu observer une zone d'accumulation d'eau qui a engendré le développement de l'altération au-dessus de la roche saine. Par exemple, le remplacement de la matrice calcaire observée à environ 9,3 m dans le sondage carotté 2 (fig. 13-26). Cette accumulation d'eau n'est pas observée dans les faciès fracturés. On a également constaté des traces d'oxydation (précipitation de minéraux) qui témoignent du passage de l'eau à travers des fractures de haute conductivité hydraulique.

15.4. Mesures à l'aide du système triaxial

Le dispositif triaxial a montré sa versatilité pour les mesures des propriétés hydriques de la ZNS. Nous avons réussi à effectuer des mesures de conductivité hydraulique en conditions saturée et non saturée sans devoir changer de dispositif et avec la possibilité d'enchaîner les essais. Grâce à l'automatisation, nous avons gagné du temps et nous avons réussi à relier les étapes de saturation préalables à la mesure de conductivité hydraulique à saturation et en condition non saturée. Néanmoins, les résultats de K_{sat} obtenus pour certains échantillons par rapport aux valeurs de $K(\theta)$ sont discutables car les valeurs obtenues sont plus faibles que celles attendues. Il aurait fallu comparer les mesures de K_{sat} avec une autre méthode expérimentale pour comparer avec les résultats obtenus avec le système triaxial.

La mise en œuvre de la méthode multistep couplée au système triaxial a nécessité la vérification des propriétés des éléments du dispositif, notamment ceux assurant la continuité hydraulique à travers l'ensemble du système. Pour cette raison, les propriétés hydriques de la pierre poreuse, de la pâte des billes verre et de la céramique ont été mesurées pour préciser l'influence de chacune de ces composantes. Dans un premier temps, la pierre poreuse faisait partie du montage pour aider à homogénéiser l'injection d'azote dans l'échantillon. Finalement, on a décidé de l'enlever à cause de l'apport d'eau fourni par la pierre pendant le drainage lors de l'essai non saturé. Lorsqu'elle est présente, la pierre poreuse apporte un volume d'eau important, alors que l'objectif est de désaturer l'échantillon. Cet effet est seulement présent lors du premier palier, car la pierre se désature très vite à ce moment-là. On n'observe plus l'effet de la pierre poreuse à partir de la deuxième étape. De plus, en présence de la pierre poreuse, les essais sont plus longs étant donné l'eau qui est drainée de la pierre poreuse (environ 10 cm³) et qui doit traverser l'échantillon, ce qui prend entre 1 et 2 jours. On a aussi observé que la courbe de rétention est légèrement décalée vers des valeurs plus élevées (surestimation) ce qui est probablement lié à l'incertitude sur l'eau drainée par la pierre poreuse lors du pesage. La pâte des billes de verre a aussi été étudiée, car son influence est la plus importante. L'un des problèmes souvent observé avec les essais en condition non saturée est le mauvais contact entre l'échantillon et la céramique. La pâte des billes de verre a servi à améliorer ce contact. Cependant, on a observé une légère impédance hydraulique à partir de la désaturation de la pâte (entre 200 et 300 cmH₂O). Cet effet est

négligeable quand l'épaisseur de la pâte est faible, inférieure à 2 mm. Pour cette raison, la pâte a été enlevée.

Par rapport à la céramique, elle a été choisie en fonction des échantillons à passer et en fonction du protocole établi. Grâce à sa valeur élevée de conductivité hydraulique à saturation, aucun problème n'a été observé, car les échantillons étudiés possèdent des valeurs de conductivité plus faibles que celle de la céramique donc elle ne représente pas une barrière hydraulique significative. La céramique est indispensable dans les essais non saturés. Elle a été utilisée aussi pendant les essais saturés pour éviter de tout démonter, ce qui risquait de perturber l'échantillon pendant les manipulations. L'impédance de la céramique a été calculée pour minimiser tout effet de perte de charge hydraulique à travers l'ensemble de l'échantillon.

CHAPITRE 16: DISCUSSION ET PERSPECTIVES

16.1. Mesure des propriétés hydriques

Les courbes de rétention en eau obtenues à l'aide du système triaxial en appliquant la méthode multistep outflow ont été comparées avec celles obtenues avec la méthode classique de la presse de Richards. Les résultats ont été satisfaisants, malgré les différences observées par rapport aux valeurs de la teneur en eau à l'état de saturation, qui sont plus élevées lorsqu'on les mesure à l'aide de la presse de Richards. Plusieurs aspects jouent sur ce fait. Le principal est la façon de saturer les échantillons. Pendant un essai triaxial, l'échantillon est saturé directement avec le dispositif de mesure tandis que pour l'essai à l'aide de la presse de Richards, la saturation est faite préalablement et par capillarité avec un autre dispositif. Le deuxième aspect est le temps de drainage qui est plus court avec le système triaxial. Avec la presse de Richards, le temps d'essai est d'au moins cinq jours, ce qui permet de drainer un volume d'eau plus important. Le confinement appliqué à l'échantillon dans la cellule triaxiale a pu jouer (notamment pour les échantillons de marne limoneuse) sur les courbes de rétention par rapport à un échantillon sans consolidation, comme mesuré dans la presse de Richards et dans la plupart de techniques conventionnelles de mesure en laboratoire. Pour atteindre des valeurs de teneurs en eau proche de l'état sec, le potentiomètre WP4C a été utilisé. Les données obtenues sont cohérentes, sauf celles concernant la roche dans le domaine de pF 3-4.

Chacune des trois méthodes présente des avantages et des inconvénients. Le système triaxial permet de coupler la mesure des courbes de rétention avec celles des courbes de conductivité hydraulique sur un même échantillon, ce qui garantit une meilleure cohérence des résultats des propriétés hydriques. Cependant, les courbes de rétention en eau sont parfois surestimées, car le temps de drainage est conditionné au critère de débit en sorti, c'est-à-dire qu'on privilégie à la mesure de conductivité hydraulique à celle de la teneur en eau. En revanche, la presse de Richards privilégie la teneur en eau de l'échantillon à la place du débit en sortie, qui n'est pas mesuré. Le dispositif WP4C, quant à lui, permet de mesurer des valeurs de teneur en eau qui ne sont atteintes par

aucune méthode expérimentale classique. On peut dire que le système triaxial est efficace pour mesurer de manière couplée les propriétés hydriques d'un matériau, mais il est quand même intéressant de valider les résultats avec d'autres méthodes complémentaires, spécifiques aux différentes propriétés mesurées. La méthode de la presse de Richards a servi comme méthode complémentaire pour valider les courbes de rétention en eau, mais qui ne peut pas être prise comme la seule méthode expérimentale, vu ses contraintes. Le dispositif WP4C est, dans tous les cas, un outil nécessaire vu la gamme de valeurs qu'il permet de mesurer. Le choix des techniques varie en fonction des besoins.

Les résultats des mesures de conductivité hydraulique à saturation des échantillons de sol et de la couche de marne moins profonde (jusqu'à 3 m de profondeur) ont été comparés avec les mesures réalisées par Ould-Mohamed (1995). L'auteur a fait les mesures à l'aide d'un dispositif à charge constante (fig. 16-1), sur les mêmes horizons, dans une parcelle à proximité du lieu-dit « les Hôtels ». La taille des échantillons prélevés était de 13,5 cm de diamètre et 7 cm de hauteur.

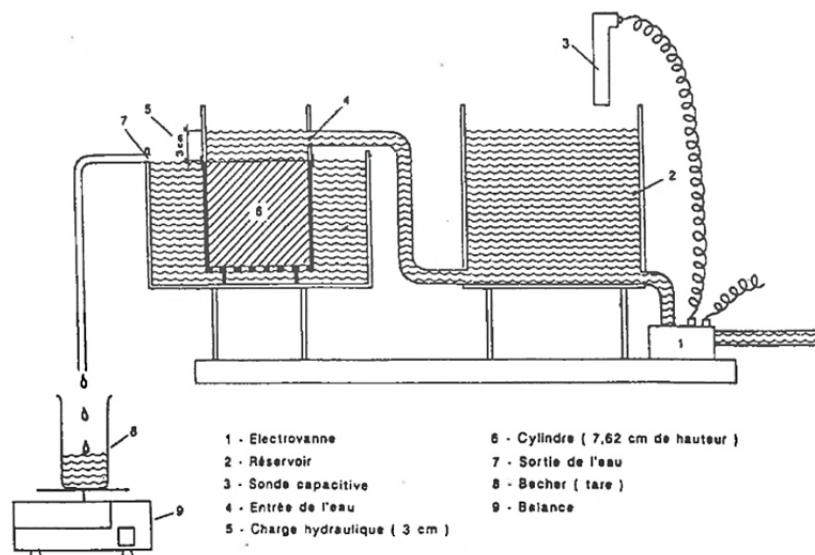


Figure 16- 1 Schéma du dispositif utilisé pour la détermination de Ksat (Carvalho, 1990, d'après Ould-Mohamed, 1995).

Les résultats de la teneur en eau à saturation obtenus par Ould-Mohamed (1995) sont cohérents avec les résultats que nous avons obtenus à l'aide du système triaxial en régime permanent (charge constante). Cependant, les résultats de conductivité hydraulique à saturation que nous avons obtenus sont largement plus faibles que ceux obtenus par Ould-Mohamed (1995). Pour le sol limono-argileux situé à une profondeur

comprise entre 25 et 75 cm, l'auteur a obtenu une valeur de conductivité hydraulique à saturation de 25 cm/j et une teneur en eau volumique à saturation de 44%, alors que les valeurs moyennes que nous avons obtenues sont de 0,02 cm/j et 40,5 %, respectivement. Pour l'ensemble cryoturbé, celui qui nous avons décrit comme marne sableuse, la valeur moyenne de teneur en eau à saturation était d'environ 35% et la conductivité hydraulique à saturation d'environ 44 cm/j, alors que celles que nous avons obtenues sont de 0,0165 cm/j et 38,5 %, respectivement. La différence de K_{sat} est peut-être liée à la taille de l'échantillon, dont le volume est 9 fois plus important que celui des échantillons prélevés pour les essais triaxiaux. Un autre effet peut-être lié à un éventuel défaut d'étanchéité entre l'échantillon (prélevé par Ould-Mohamed, 1995) et la paroi du cylindre métallique de prélèvement, notamment en présence de particules grossières. Cela peut créer des écoulements préférentiels qui peuvent entraîner une surestimation de la conductivité hydraulique à saturation. Dans le cas du système triaxial, le confinement appliqué sur la membrane flexible évite tout écoulement entre la membrane et l'échantillon et oblige l'eau à traverser l'échantillon dans sa totalité. Pour l'échantillonnage de la ZNS, on a prélevé des échantillons plus ou moins homogènes et nous avons évité de prélever des particules grossières qui dépassent les 5 millimètres lorsqu'elles n'étaient pas représentatives de l'échantillon.

16.2. Dispositif triaxial

Toute la gamme des échantillons présents le long de la ZNS a été étudiée sur un même dispositif, malgré des natures de matériau très différentes (matériaux meubles, friables, durs). Nous avons réussi à appliquer une contrainte physique à l'échantillon pour reproduire l'effet lithostatique pour les échantillons profonds de la ZNS. Cependant, nous avons montré qu'il n'était pas nécessaire d'appliquer une telle consolidation à certains échantillons (ayant une plasticité importante) car ceux-ci avaient conservé la même masse volumique apparente qu'au terrain, c'est-à-dire qu'ils n'avaient pas subi d'expansion importante au moment du carottage. Cependant, il est nécessaire d'appliquer un léger confinement pour bien plaquer la membrane contre l'échantillon pour éviter tout écoulement préférentiel entre l'échantillon et la membrane.

Les débits obtenus pendant les mesures des propriétés hydriques étaient parfois très faibles. Grâce aux capteurs utilisés, nous avons pu mesurer des débits inférieurs à 10

mm³/h, ce qui nécessite une bonne résolution et une précision élevée. Aucun problème de cavitation ou de blocage à cause de bulles d'air n'a été observé pendant les essais grâce au système de désaération. Grâce à la robustesse du système triaxial, la technique de translation de pression a pu être appliquée. Cela a aidé à réduire la présence d'air libre dans le système.

Pour le suivi de la variation de volume de l'échantillon, il serait intéressant de pouvoir installer des capteurs de déplacement à l'intérieur de la cellule pour améliorer la précision de cette mesure (sauf pour les échantillons durs de roche non déformables pour lesquels c'est inutile). Il serait utile de pouvoir compter sur des mesures tensiométriques pour observer la transition de potentiel hydrique entre chaque palier. Les capteurs de pression du système triaxial ont une résolution de 1 KPa (10 cm). Des transducteurs plus précis devraient être couplés aux tensiomètres pour améliorer la mesure du potentiel hydrique.

16.3. Relation entre les propriétés physiques et les propriétés hydriques des matériaux et implication pour le transport de l'eau vers la nappe

Les caractéristiques observées des matériaux meubles de la ZNS ont montré une hétérogénéité assez importante dans les premiers 7 m de profondeur. Cette hétérogénéité a été aussi constatée par les résultats des propriétés hydriques. La première couche rencontrée dans la ZNS (sol) présente une capacité d'interaction eau-solide relativement élevée par rapport aux autres faciès. Cette réactivité vis-à-vis de l'eau a été expliquée par la présence des minéraux argileux et en moindre proportion par la teneur en matière organique. Cela a un effet sur les propriétés de rétention du matériau, ainsi que sur sa conductivité hydraulique notamment en condition non saturée. Ce faciès présente la capacité rétention en eau la plus élevée, ce qui est directement lié à sa nature physique et géochimique. Sa capacité à conduire l'eau diminue dès qu'il commence à se désaturer. Donc un temps de transfert long est attendu pour ce faciès (quelques cm/an).

Les propriétés physiques des marnes ont montré une capacité d'interaction avec l'eau plus faible que celle du sol, mais une forte hétérogénéité verticale. Les couches de

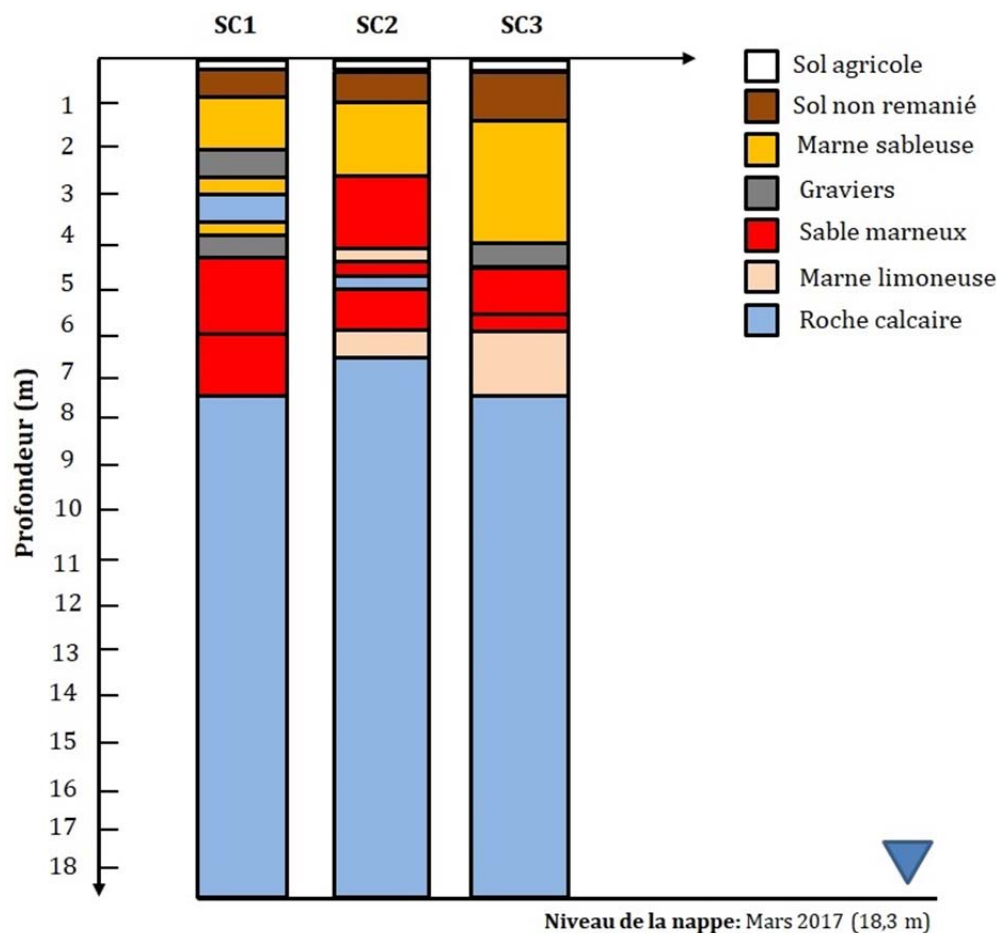
marnes sont caractéristiques d'un matériau ayant des particules de taille limoneuse à sable fin et une faible proportion de particules de taille argileuse. La teneur en carbonate trouvée dans les échantillons de marne (90 % en moyenne) est beaucoup plus élevée que celle trouvée dans le sol (15 %). Le minéral secondaire qui est présent en majeure proportion dans la marne est la palygorskite, ce qui fait diminuer l'interaction avec l'eau. Cela a été vérifié avec les mesures de surface spécifique. Cette caractéristique physique explique pourquoi la capacité de rétention de ce faciès est inférieure à celle du sol limono-argileux. Cela implique des valeurs de conductivité relativement plus élevées que celles observées pour le sol. Les intercalations de sable se différencient par la taille des grains et la faible proportion en fractions fines. On a trouvé très peu d'indices de minéraux réactifs dans ce faciès sableux, ce qui a été confirmé par les résultats des courbes de rétention, qui sont les plus faibles parmi les faciès meubles.

La roche dure a été caractérisée différemment par rapport aux faciès meubles de la ZNS. L'étude des échantillons de roche a été faite au niveau macroscopique, mais aussi au niveau microscopique, pour comprendre les propriétés de transport de la roche calcaire, qui semble imperméable à l'œil nu. L'analyse des propriétés physiques a montré que la roche saine est peu poreuse et très peu perméable. Cependant l'altération mécanique et chimique a un impact sur ses propriétés de transfert. On a observé des valeurs de porosité plus élevées pour la roche altérée par l'action chimique. La détection des minéraux secondaires à travers l'analyse géochimique a démontré qu'il y a deux types de processus de transport à différentes échelles. A l'échelle microscopique, les zones d'accumulation d'eau et les microfissures contribuent à la transformation graduelle de la matrice calcaire. Les phénomènes d'altération et de dissolution observés dans la roche calcaire, produits par les gradients chimiques et la diffusion de l'eau, modifient la porosité primaire de la matrice carbonatée jusqu'à ce que cette microporosité augmente et devienne interconnectée au cours du temps, ce qui engendre de nouveaux chemins de migration de l'eau vers la nappe. A l'échelle macroscopique, on a constaté la présence d'oxydes de fer sur les surfaces exposées de la roche fracturée, au niveau de fractures millimétriques et centimétriques. Les résultats des mesures des propriétés hydriques sont cohérents avec les caractéristiques physiques de la roche. Les échantillons de roche n'ayant pas de fissures ni de pores visibles à l'œil nu ont présenté de valeurs de conductivité hydraulique très faibles et une faible capacité de rétention. La faible

porosité de la roche est notamment une porosité secondaire d'origine chimique (remplacement de la matrice calcaire ou dissolution) dans laquelle l'eau circule très peu et reste stockée dans certains pores faiblement connectés. En revanche, les échantillons de roche ayant des microfissures ont montré une perméabilité plus importante qui semble contribuer à la recharge de l'aquifère à une échelle de temps d'une dizaine d'années. L'étude hydrique des macrofractures n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail de recherche, mais la géochimie a démontré qu'elles font partie des chemins parcourus par l'eau qui alimente la nappe phréatique de l'aquifère des Calcaires de Beauce.

16.4. Estimation du temps de transport de l'eau vers la nappe à travers la ZNS

En fonction de la nature des couches sédimentaires de la ZNS du site d'étude, une synthèse des coupes lithologiques a été faite afin d'estimer le temps de transport de l'eau de la surface jusqu'à la nappe (fig. 16-2). Nous avons considéré l'ensemble des roches calcaires dures comme une couche homogène unique.



A partir de la teneur en eau du terrain, θ_{terr} , mesurée expérimentalement selon la norme NF P 94-050 (AFNOR, 1995 ; tab. 16-1) et des courbes de conductivité hydraulique, $K(\theta)$, pour les échantillons les plus représentatifs, il a été possible d'obtenir le temps moyen de transport pour chaque couche étudiée. Le calcul du temps de transport s'est fait selon :

$$T_{\text{cum}} \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i(\theta_i)} \quad \dots (16-1)$$

où L_i (m) est l'épaisseur de la couche sédimentaire i . Certains échantillons représentatifs ont été choisis pour les estimations, bien qu'ils n'appartiennent ni au sondage ni à la profondeur exacte (tab. 16-1). Par exemple, l'échantillon 40-45 cm SC1, appartenant au SC1, a été aussi considéré comme représentatif de l'intervalle 20-90 cm du SC2 (tab. 16-1). Le critère de sélection des couches a privilégié les similitudes entre les propriétés physiques et la disponibilité des mesures des propriétés hydriques, puisque certains intervalles de la ZNS n'ont pas été étudiés.

Tableau 16- 1 Coupes lithologiques synthétisées de trois sondages carottés de la ZNS dans le site d'étude. θ_{terr} : teneur en eau de l'échantillon juste après le prélèvement au terrain selon la norme NF P 94-050 (AFNOR, 1995). *Données non disponibles. La valeur de $K(\theta)$ est considérée égale à K_{sat} pour le faciès de roche le plus profond.

Sondage	Couche	Faciès	I.D	Profondeur (m)	θ_{terr} (cm ³ .cm ⁻³)	h_{terr} (cm)	$K(\theta)$ (cm/j)	T_{cum} (années)
SC1	0	Surface	-	0,0	-	-	-	0
	1	Sol	40-45 cm-SC1	0,6	37,52	-101,5	2,52E-02	6,51
	2	Marne sableuse	1,2-1,25 m-SC2	1,8	34,85	-9,7	9,56E-02	9,95
	3	Grave	-	2,2	-	-	-	9,95
	4	Marne sableuse	1,2-1,25 m-SC2	2,6	34,85	-9,7	9,56E-02	11,10
	5	Roche	16,1-16,2 m-SC2 ^	3,2	13,04	-7,5	6,76E-01	11,34
	6	Marne sableuse	1,2-1,25 m-SC2	3,5	34,85	-9,7	9,56E-02	12,20
	7	Grave	-	4,0	-	-	-	12,20
	8	Sable marneux	5-5,1 m-SC1	5,7	29,41	-45,0	3,18E-02	26,84
	9	Sable marneux	4-4,2 m-SC3	7,1	27,14	-5,0	4,07E-01	27,79
SC2	10	Roche	-	18,3	*	*	* 6,76E-01	32,32
	0	Surface	-	0,2	-	-	-	0
	1	Sol	40-45 cm-SC1	0,9	37,52	-101,5	2,52E-02	7,60
	2	Marne sableuse	1,2-1,25 m-SC2	2,5	34,85	-9,7	9,56E-02	12,18
	3	Sable marneux	3,6-3,9 m-SC2	4,1	29,41	-29,9	9,33E-02	16,88
	4	Marne limoneuse	6,3-6,35 m-SC2	4,4	34,85	-15	4,37E-02	18,76
	5	Sable marneux	4-4,2 m-SC3	4,7	27,14	-5,0	4,07E-01	18,97
	6	Roche	16,1-16,2 m-SC2 ^	5	13,04	-7,5	6,76E-01	19,09
	7	Sable marneux	4-4,2 m-SC3	5,9	27,14	-5,0	4,07E-01	19,69
	8	Marne limoneuse	6,3-6,35 m-SC2	6,5	34,85	-15	4,37E-02	23,46
SC3	9	Roche	16,1-16,2 m-SC2 ^	18,3	*	*	* 6,76E-01	28,24
	0	Surface	-	0,6	-	-	-	0
	1	Sol	40-45 cm-SC1	1,3	37,52	-101,5	2,52E-02	7,60
	2	Marne sableuse	1,2-1,25 m-SC2	4	34,85	-9,7	9,56E-02	15,34
	3	Grave	-	4,5	-	-	-	15,34
	4	Sable marneux	4-4,2 m-SC3	5,5	27,14	-5	4,07E-01	16,01
	5	Sable marneux	3,6-3,9 m-SC2	6,1	29,41	-29,9	9,33E-02	17,77
	6	Marne limoneuse	6,3-6,35 m-SC2	7,7	34,85	-15	4,37E-02	27,81
	7	Roche	-	18,3	*	*	* 6,76E-01	32,11

Les hypothèses suivantes ont été considérées:

- Chaque couche a été considérée homogène. Il est possible que la valeur de conductivité hydraulique réelle du terrain soit plus large que celle calculée en laboratoire.
- Dans les endroits où il y a des horizons de graviers (particules de plus 2 cm de diamètre), l'impédance hydraulique a été négligée, donc la densité de flux est infinie et le temps de transfert nul (transfert instantané).
- Le gradient gravitaire a été considéré comme la seule force qui joue dans l'écoulement des eaux vers la nappe.
- Les faciès de roches dures ont été considérés comme homogènes et ayant une porosité connectée.

A partir de ces hypothèses, on a obtenu le diagramme suivant qui exprime le temps de transfert de l'eau en fonction de la profondeur, de la surface jusqu'à la nappe.

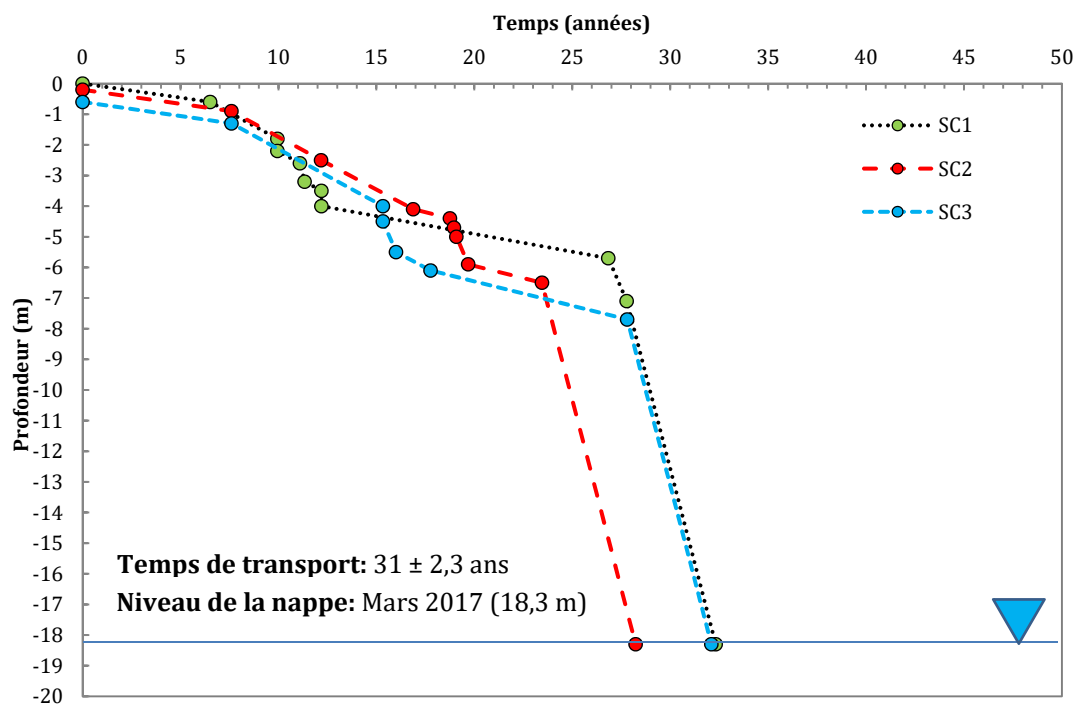


Figure 16- 3 Temps de transport de l'eau à travers la ZNS du site d'étude à Villamblain.

Pour un état hydrique proche de celui mesuré expérimentalement au labo juste après le prélèvement des carottes en mars 2017, on trouve un temps de transport moyen de la surface jusqu'à la nappe d'environ 31 ans (fig. 16-3). Dans le premier mètre, ainsi qu'à environ 4 à 8 m de profondeur dans la ZNS, on observe une durée de transport plus

importante étant donné les fortes propriétés de rétention des couches limono-argileuse de sol et des couches limoneuses de marne, respectivement. Dans le sondage SC2, la couche de marne plus plastique possède une faible épaisseur (entre 6 et 6,4 m) ce qui réduit le temps de déplacement des eaux. En revanche, c'est la couche de sol qui impose une barrière hydrique à travers une couche d'environ 60 cm d'épaisseur où le temps de transport est d'environ 8 ans. Le faciès de roche calcaire dure est présent dans les trois sondages carottés avec presque la même épaisseur jusqu'à la nappe. C'est au niveau de la roche que le temps de transport de l'eau est le plus court, si l'on considère l'hypothèse d'une roche avec une porosité connectée sur toute son épaisseur.

Le temps de transport des eaux vers la nappe a été estimé par ANTEA Group dans le cadre du projet ESPOL (ANTEA Group, 2017) à partir de la simulation du transfert de solutés en zone non saturée avec un modèle à double porosité, prenant en compte, pour l'ensemble de la ZNS, une teneur en eau immobile de 9% avec laquelle l'eau de la porosité mobile échange des solutés. La géométrie établie pour le modèle comprend trois couches homogènes : calcaire de Pithiviers, Molasse du Gâtinais et Calcaire d'Etampes, de 5, 7 et 16 m d'épaisseur respectivement, et un niveau piézométrique trouvé à 28 m (fig. 16-4).

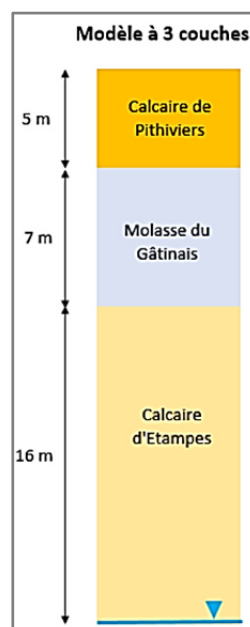


Figure 16- 4 Schéma de la ZNS pour les deux sites modélisés (ANTEA Group, 2017).

La concentration de soluté (bromure) imposée en haut de la ZNS était de 400 mg/L pendant 40 ans pour la 1^{ère} période, 200 mg/L pendant 10 ans pour la 2^{ème} période et

100 mg/L pendant 87 ans pour la 3^{ème} période afin de simuler une baisse de la pression de contamination. Dans les conditions considérées, quarante ans après le début d'entrée d'une eau à la concentration de 400 mg/L en haut de la ZNS, la concentration en bas de la ZNS est toujours inférieure à cette valeur et atteint environ 320 mg/L (courbe double porosité-3 couches, fig. 16-5). Le maximum de concentration à la base de la ZNS (365 mg/L) est atteint environ 10 ans après la réduction de moitié (200 mg/L) de la concentration dans l'eau entrant en haut de ZNS. Dans le cas de ce modèle, la diminution de la concentration dans l'eau à la base de la ZNS est très lente à intervenir après réduction de la concentration entrante à 100 mg/L. Vingt ans après cette réduction, la concentration simulée en bas de la ZNS est toujours de 215 mg/L. Un niveau de concentration proche de celui en entrée de la ZNS est atteint vers la fin de la simulation, environ 70 ans après la réduction des concentrations entrantes (ANTEA Group, 2017).

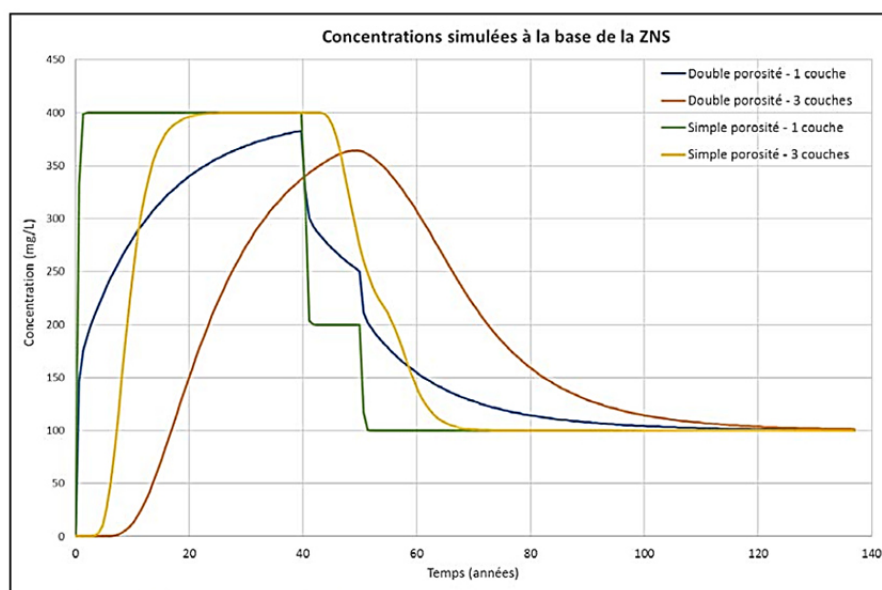


Figure 16- 5 Concentrations simulées à la base de la ZNS pour les quatre configurations testées (ANTEA Group, 2017). Seulement la courbe double porosité-3 couches a été décrite préalablement.

Le phénomène d'adsorption ou les interactions entre les contaminants et la phase solide, cités par ANTEA Group (2017), peuvent encore ralentir leur temps de migration à travers la ZNS. La présence de minéraux argileux, que nous avons observée, peut être à l'origine de ces phénomènes. Ces minéraux peuvent interagir avec les solutés et peuvent aussi expliquer l'existence d'une porosité double, dont la plus fine ne contribue pas à l'écoulement gravitaire (eau immobile). La présence de ces minéraux argileux explique aussi les valeurs élevées de rétention en eau obtenues pour les faciès de sol et de marne de la ZNS.

La prédiction des temps de transfert dans la ZNS en Beauce est complexe, aussi bien au niveau des sédiments meubles que des couches calcaires, qui possèdent une porosité hétérogène, liée à la présence d'un réseau de fractures et de microfissures. Les densités de flux d'eau peuvent atteindre, dans certaines situations, quelques cm/j. Cependant, si la roche n'a pas de microfissures, ni d'altération chimique, la percolation de l'eau à travers la roche ne pourrait jamais se produire. Dans une telle condition, le transport des eaux vers la nappe a lieu à travers des chemins préférentiels, tels que les fractures, dans lesquelles la seule force qui intervient est la gravité.

16.5. Perspectives

Dans cette étude sur les propriétés de transfert de la ZNS, les faciès les plus représentatifs de la ZNS de l'aquifère des Calcaires de Beauce, sur le site d'étude, lieu-dit « les Hôtels », ont été caractérisés. Nous avons mis en relation les propriétés physiques et géochimiques des matériaux avec leurs propriétés hydriques. Cette étude couplée nous a permis de mieux comprendre les phénomènes de transfert au regard de chaque lithologie de la ZNS. Cependant, certaines expériences complémentaires permettraient de comparer et d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus.

16.5.1. Mesure des courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique

Les courbes de rétention en eau ont été mesurées à l'aide du système triaxial et de la presse de Richards. Il aurait fallu également comparer les résultats avec une troisième méthode expérimentale, telle que la méthode de Wind. Cette méthode peut être utilisée pour mesurer les courbes de rétention des matériaux meubles, tels que le sol, la marne et le sable. L'avantage de ce dispositif est que c'est une méthode de débit d'extraction par évaporation et donc les valeurs des teneurs en eau sont très fiables étant donné qu'il n'y a pas de manipulation sur les échantillons pour faire les pesages répétés.

Les résultats des courbes de conductivité hydraulique à saturation n'ont pas été comparés avec une autre technique de mesure. Les valeurs obtenues à l'aide du système triaxial sont plus faibles que celles trouvées dans la littérature, notamment pour les faciès

de sol. La méthode de Wind est une technique intéressante aussi pour obtenir les courbes de conductivité hydraulique de matériaux meubles.

Il aurait été aussi intéressant de faire des essais « *one-step* » sur les mêmes échantillons pour comparer les courbes de conductivité hydraulique avec celles obtenues par la méthode « *multistep* ». La technique de débit d'extraction « *one-step* » ne peut pas être appliquée avec le système triaxial, donc un autre montage peut être utilisé, par exemple, un extracteur à plaque poreuse (fig. 4-11) couplé à une source de pression qui permet d'augmenter la pression graduellement.

16.5.2. Expériences de traçage

Aucune expérience de traçage n'a été réalisée sur les échantillons cylindriques utilisés pour la caractérisation des propriétés hydriques des matériaux à l'aide du système triaxial. Dans le cadre de ce travail de recherche, plusieurs essais de traçage sur des colonnes de sol et de marne sableuse ont été faits (données non présentés ici). Les échantillons prélevés avaient 60 et 30 cm de hauteur et 20 cm de diamètre (fig. 16-6).

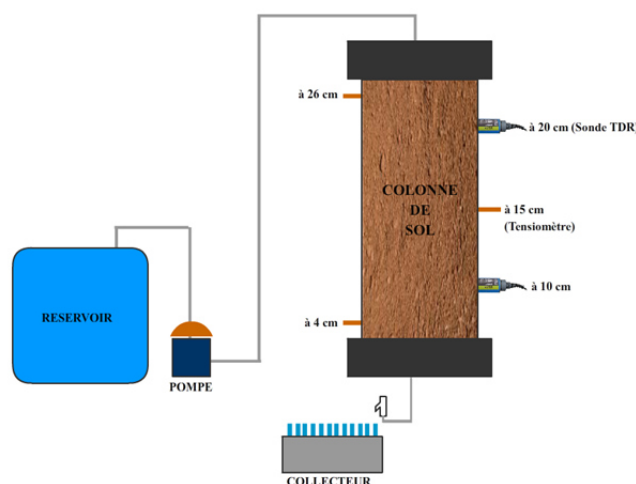
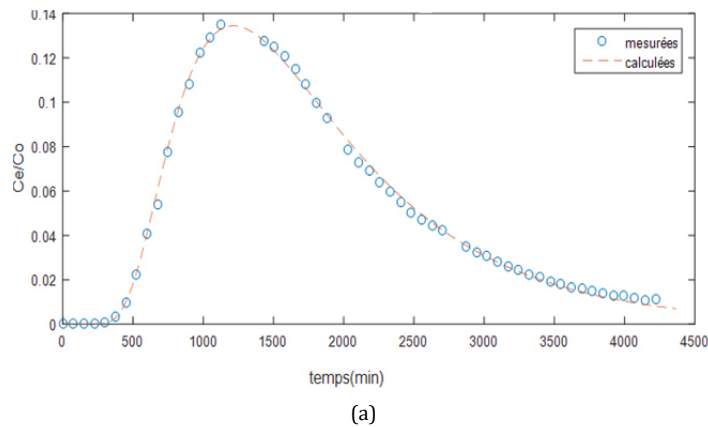


Figure 16-6 Schéma du dispositif expérimental pour les essais de traçage sur colonne (d'après Viel, 2016).

L'idée serait de mettre en place un système de simulation de pluie qui soit adapté à la taille des échantillons passés au système triaxial (7 cm de diamètre et 3 cm de hauteur) pour pouvoir y injecter un traceur et obtenir des courbes de percée. Cela permettra de mesurer les temps de transfert de polluants à travers les cylindres et, par la suite, faire l'ajustement des paramètres de transport (fig. 16-7).



PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES	
Type d'ajustement:	ECD
Traceur	DFBA
Coef de diffusion aqueuse (m ² /s)	0,00
R (Facteur de retard)	1,00
μ (min ⁻¹)	0,00
v (cm/min)	1,71E-02
D (cm ² /min)	8,53E-02
λ (cm)	4,99
R^2	1,00
RMSE	0,19

(b)

Figure 16- 7 a) Courbe de percée d'un sol limono-argileux de Villamblain ajustée à l'équation de convection-dispersion classique, b) ajustement des paramètres de transport obtenus à l'aide du logiciel STANDMOD.

16.5.3. Ajustement de paramètres hydriques et modélisation du temps de transfert à travers l'ensemble de la ZNS

Il est possible de réaliser, à partir des données obtenues à l'aide du système triaxial, des estimations des paramètres hydriques des différents faciès de la ZNS avec l'outil d'ajustement RETC (van Genuchten et al., 1991), ainsi qu'à l'aide du modèle HYDRUS-1D (Simunek et al., 2013) (fig. 16-8). On présente ici un exemple de résultats qui donne une idée de l'ajustement obtenu à partir des mesures expérimentales.

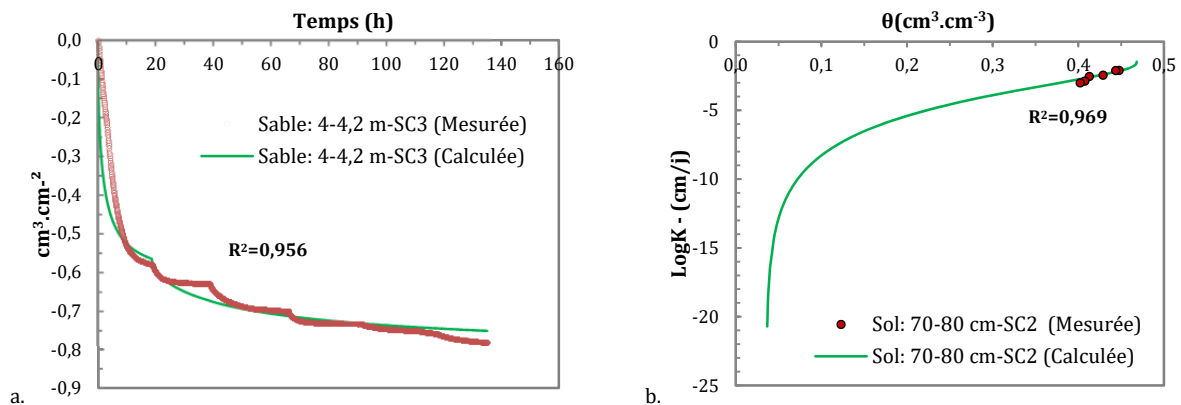


Figure 16- 8 a) Courbe de volume cumulé obtenue lors de l'essai multistep à l'aide du système triaxial simulée à l'aide du modèle HYDRUS-1D, b) courbe de conductivité hydraulique ajustée au modèle Mualem-van Genuchten avec RETC.

L'étape suivante serait de regrouper chaque couche sédimentaire pour les intégrer dans un modèle global, afin d'estimer les temps de transfert de l'eau de la surface jusqu'à la nappe. Selon la nature des matériaux, il convient de considérer un ensemble multicouche et, éventuellement, considérer un modèle double porosité pour certaines couches (§16.4; ANTEA Group, 2017).

CONCLUSION GENERALE

La démarche scientifique suivie nous a permis de connaître en détail la ZNS du site d'étude qui fait partie de l'aquifère des Calcaires de Beauce. Ce travail scientifique est la première étape d'un programme de recherche sur la zone non saturée, qui a permis de répondre à certaines questions, mais qui en pose d'autres. Pour répondre à l'objectif général, trois étapes principales ont été distinguées (chap. 1).

Première étape : Choix du site d'étude et échantillonnage de la zone d'étude

Le **choix du site** s'est basé sur quatre critères principaux : la qualité des eaux (forte augmentation de la concentration en nitrates lors des dernières années), des critères hydrogéologiques (nappe peu profonde et accès à l'eau de la nappe), des critères pédologiques (sols représentatifs de la zone) et des critères agronomiques (surface agricole utile et irrigation sur 93 % de la zone). Le fait que cette zone a été étudiée dans les dernières années facilite la disponibilité des données (sous-sol, météo, données piézométriques), qui sont fondamentales pour aider à caractériser notre site d'étude et le système hydrogéologique représenté par la ZNS de l'aquifère.

L'échantillonnage de la ZNS a représenté un enjeu majeur vu la difficulté d'accès à l'ensemble la ZNS. Les travaux de carottage à l'aide d'une machine de forage ont facilité le prélèvement des échantillons tout en préservant leur intégrité. La plupart des carottes récupérées de la ZNS étaient intactes, ce qui a permis de faire une description correcte des matériaux sédimentaires et de cibler les zones à prélever, en fonction des analyses envisagées.

Deuxième étape : Description de l'ensemble des faciès de la ZNS et caractérisation des propriétés physiques et géochimiques des matériaux

L'étape d'observation des échantillons prélevés était très importante, car elle nous a aidé à comprendre en détail la géologie du site d'étude, ainsi qu'à établir un programme de travail pour atteindre les objectifs spécifiques établis (§1.2). L'analyse des carottes prélevées a montré que, sur le secteur d'étude (lieu-dit « les Hôtels »), l'aquifère des Calcaires de Beauce est un aquifère multicouche constitué par l'alternance de trois

principales formations hydrogéologiques sédimentaires perméables : le sol, la marne avec des intercalations de sable, et la roche calcaire dure. Parmi les couches sédimentaires meubles, la marne est la plus épaisse avec environ 5 mètres d'épaisseur. Les séquences lithologiques de chacun des 3 sondages carottés sont similaires et elles peuvent en partie se corrélérer latéralement. La profondeur de la roche calcaire dure s'étend d'environ 7 m jusqu'à la nappe, qui a été trouvée à 18,3 m lors des forages en mars 2017.

Parmi les caractéristiques observées pour le sol, on trouve une consistance plastique avec très peu d'éléments grossiers et une masse volumique apparente relativement élevée. La texture de la marne est variable, avec des particules grossières pour les couches moins profondes, mais qui devient très limoneuse pour les couches trouvées à partir de 6 m. Les intercalations de sable possèdent des particules grossières et très peu de fraction argileuse. Les analyses de calcimétrie ont démontré que la nature des particules sableuses était calcaire et non pas silicatée (quartz). Pour le faciès de roche dure, on a observé un réseau important des fractures tout au long de cette lithologie. Parfois la roche est saine, parfois la matrice calcaire est remplacée (roche altérée). Des vacuoles de dissolution sont également observées dans quelques niveaux de la roche. Vers la zone de rebattement de la nappe, la structure de la roche est complètement désagrégée avec des vacuoles de dissolution importantes causées par l'action de l'eau.

Les **propriétés physiques et géochimiques des matériaux** ont été mesurées à l'aide des différentes analyses de laboratoire pour caractériser la nature des matériaux et associer leurs résultats aux propriétés hydriques. Parmi les propriétés les plus importantes mesurées figurent la distribution de taille de grains et de vides, la porosité, la surface spécifique des grains et la minéralogie.

Troisième étape : Conception du dispositif expérimental et mesures de propriétés hydriques

Cette étape a pris en compte les résultats de l'étape précédente et la nature du matériau à étudier. Le **choix du dispositif et son adaptation** ont nécessité de la rigueur technique et de nombreux essais pour pouvoir valider un protocole fiable, adapté à toute la gamme des matériaux étudiés. Le système de mesure a montré sa versatilité, une

bonne résolution et une précision élevée pendant les mesures. Le problème du contact entre l'échantillon et la céramique était un aspect à surveiller pendant les mesures. Ce problème a été cité par de nombreux auteurs qui ont appliqué les techniques de débit d'extraction par drainage. La consolidation est aussi un aspect important qui nécessite des mesures de déformation pour connaître l'effet d'expansion des échantillons quand ils sont prélevés. La technique de mesure multistep nous a permis d'acquérir simultanément des données expérimentales de débit et de potentiel, ce qui permet d'associer mesures de teneur en eau, de potentiel matriciel et de conductivité hydraulique.

Deux principales méthodes ont été appliquées pour caractériser les propriétés de rétention en eau : le système triaxial couplé à la technique de débit d'extraction multistep et la presse de Richards. Les courbes de rétention obtenues par chaque méthode ont été comparées pour valider les résultats. Les données obtenues sont satisfaisantes ? car les valeurs de rétention en eau sont cohérentes dans la gamme non saturée. Cependant, à l'état saturé, on a observé des différences de valeur de teneur en eau à saturation, qui est surestimée par la méthode de presse de Richards. Cela avait déjà été constaté dans la littérature.

Les courbes de conductivité hydraulique n'ont pas été comparées avec d'autres méthodes. Les valeurs de conductivité hydrauliques à saturation des échantillons de sol et de marne ont cependant été comparées à des données de la littérature. Les valeurs que nous avons obtenues sont faibles par rapport à celles trouvées dans la littérature. Cependant, cela peut être expliqué par différents aspects tels que la technique de prélèvement (échantillons intacts), la fraction de taille de grain des échantillons analysés (<5 mm), les dimensions des échantillons et la contrainte de consolidation appliquée pendant les essais au laboratoire.

Synthèse : les transferts d'eau dans la ZNS étudiée

Le transfert de l'eau de la surface vers la nappe est principalement contrôlé par les faciès ayant les propriétés de rétention en eau les plus élevées. Ce sont les faciès de sol et les faciès de marne limoneuse, qui ralentissent l'écoulement vers la nappe étant donné leur capacité d'interaction avec l'eau. Ce fait est aussi lié à la nature des particules qui

constituent les matériaux de la ZNS. Les couches sableuses intercalées avec les faciès marneux sont les plus conductrices, ainsi que les faciès de roches fracturée et/ou fissurée. La roche est une barrière imperméable en absence de fissures, car son caractère peu hydrophile (matrice calcaire saine) et sa très faible porosité ne permettent pas le passage de l'eau à travers la matrice cimentée par la diagenèse. Il a été démontré que, malgré la faible porosité de la roche saine, il existe une transformation à l'échelle microscopique correspondant au remplacement de la matrice calcaire par des minéraux argileux. Ce phénomène permet d'affirmer que la roche subit une altération par l'action de l'eau qui engendre une porosité secondaire dans la matrice et rend la roche poreuse et perméable. Cette porosité est souvent isolée, mais peut représenter une part importante du volume poral de la roche lorsque la matrice est partiellement remplacée.

L'écoulement qui peut contribuer le plus au transfert de l'eau à travers la roche dure prend place au niveau de macrofractures. L'hypothèse que l'écoulement à travers la ZNS est localement vertical peut s'appliquer dans les sédiments meubles. En revanche, l'écoulement localement vertical de l'eau à travers les faciès de roches dures est discutable, vu l'hétérogénéité du milieu poreux.

Finalement, nous avons estimé le **temps moyen de transport de l'eau** de la surface vers la nappe en considérant plusieurs critères et une zone non saturée multicouche. Les résultats obtenus ont été comparés avec des travaux de recherche menés dans le même contexte hydrogéologique. Dans les études précédentes, le temps de transfert est inférieur à celui que nous avons estimé, sachant que l'on a considéré un ensemble plus complexe, appuyé sur les observations de terrain et de laboratoire. Nos estimations donnent un temps de transfert de l'ordre de 30 ans, au droit du site de Villamblain, ce qui correspond à une génération humaine. On peut donc en déduire que la reconquête de la qualité de l'eau en Beauce sera donc l'affaire de plusieurs générations.

REFERENCES

- AFNOR, 1991. NF P 94-054. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.
- AFNOR, 1992. NF P 94-057. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Analyse granulométrique. Méthode par sédimentation.
- AFNOR, 1996. NF P 94-048. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Détermination de la teneur en carbonate. Méthode du calcimètre.
- AFNOR, 1995. NF P 94-050. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux.
- AFNOR, 1995. XP P94-202. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Prélèvement des sols et des roches. Méthodologie et procédures
- AFNOR, 1996. NF P 94-056. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.
- AFNOR, 1998. NF P 94-068. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- AFNOR, 1999. XP P 94-011. Norme française pour la reconnaissance et essais de sols. Description-Identification-Dénomination des sols.
- AFNOR, 2002. NF P 94-411. Norme française. Roche: Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en laboratoire. Méthode par transparence.
- Ahmed, T.H. 2001. Reservoir engineering handbook. Second edition. Gulf Professional Pub., Boston, USA.
- ANTEA Group. 2017. Projet ESPOL. Simulation du transfert de solutés en Zone Non Saturée avec un modèle de double porosité. CNRS - ISTO, Orléans, France.
- ARVOR Géotechnique. 2010. Fiche technique: Essai pressiométrique Ménard sans cycle (NF P 94-110-1).
- Barbour, S.L., D.G. Fredlund, et S. Huang. 1998. Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter. Canadian Geotechnical Journal. vol: 426-432.
- Beck, K. 2006. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 245p.

- Bittelli, M., et M. Flury. 2009. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. *Soil Science Society of America Journal*. Vol: 1453-1460.
- Bittelli, M., R. Solone, F. Tomei, et F. Morari. 2012. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. *Journal of Hydrology*. Vol:65-74.
- BRGM. 1995. Piézométrie du système aquifère de Beauce. Basses eaux 1994. Rapport n° R 38572. Orléans, France.
- BRGM. 1997. Acquisition des données pour la gestion de la nappe de Beauce Géométrie des formations tertiaires. Création d'une base de données des altitudes des formations géologiques. Rapport n° R 39598. Orléans, France.
- Brooks, R., et T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins-Colorado, USA.
- Caputo, M.C., et J.R. Nimmo. 2005. Quasi-steady centrifuge method for unsaturated hydraulic properties. Technical note. *Water Resources Research*. Vol. 41.
- Castany, G. 1998. Hydrogéologie. Principes et méthodes. Dunod. France. 236 p.
- Chossat, J.-C. 2005. La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes. Lavoisier. Paris, France. 720 p.
- Commissariat général au développement durable. 2013. Le point sur: Les teneurs en nitrates augmentent dans les nappes phréatiques jusqu'en 2004 puis se stabilisent mais de fortes disparités régionales existent. Observation et statistiques. n° 161. 4p.
- Craft, B., et M. Hawkins. 1990. Applied Petroleum Reservoir Engineering. Second edition. Prentice Hall. Louisiana State University. USA.
- Craig, R. 2005. Craig's Soil Mechanics. Seventh edition. Spon Press.
- Cresswell, H.P., T.W. Green, et N.J. McKenzie. 2008. The Adequacy of Pressure Plate Apparatus for Determining Soil Water Retention. *Soil Science Society of America Journal*. Vol: 41-49.
- Dane, J.H., et J. Hopmans. 2002. Chapter 3.3: Water Retention and Storage. In *Methods of Soil Analysis: Part 4-Physical Methods*. SSSA Book Series. 5th edition. p: 671-720.
- DIREN Centre. 2000. Gestion des ressources en eaux souterraines. Nappe des Calcaires de Beauce. Region Centre, France.
- Dirksen, C. 1999. Soil Physics Measurements. Catena Verlag GMBH. Reiskirchen, Germany. 154 p.

- Eching, S.O., J.W. Hopmans, et O. Wendroth. 1994. Unsaturated Hydraulic Conductivity from Transient Multistep Outflow et Soil Water Pressure Data. Soil Science Society of America Journal. Vol: 687-695.
- Fiche BD-LISA, Craie Normande et Picarde. 2012. FICHE ENTITE BD-LISA NV2 CRAIE DE BOURGOGNE ET DU GATINAIS. Aquifère de la Craie du Bassin Seine-Normandie. France.
- Fredlund, D.G., et H. Rahardjo. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils: Fredlund/Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA. 517 p.
- Frison, A. 2008. Analyse et modélisation des propriétés hydriques d'un horizon hétérogène de sol. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 229 p
- Fuchsberger, J., et G. Kirchengast. 2013. Deriving Soil Moisture from Matric Potential in the Wegener Net Climate Station Network. University of Graz, Austria. Note N° 1/2013, Version 1.4. 16 p.
- Gaillardet, J., 2018. OZCAR: The French Network of Critical Zone Observatories. Vadose Zone Journal. 24 p.
- Gardner, W.R. 1956. Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Plate Outflow Data. Soil Science Society Proceedings. Vol: 317-320.
- GDS Instruments Product. 2015. Controller datasheet, GDS Instruments.
- Guo, L., et H. Lin. 2016. Critical Zone Research et Observatories: Current Status and Future Perspectives. Vadose Zone Journal. Vol: 15.
- Hopmans, J., J. Simunek, N. Romano, et W. Durner. 2002. Chapter 3.6.2. Inverse Methods. In Methods of Soil Analysis: Part 4-Physical Methods. SSSA Book Series. 5th edition. p: 963-1008
- Hopmans, J., A. Tuli, M. Denton, T. Harter, et J. Intyre. 2001. Multi-step outflow experiment: From soil preparation to parameter estimation. University of California, Davis.
- InfoTerre, BRGM. 1994. Dossier du sous-sol 03622X0114/FT1-25. BRGM.
- Isphording, W.C. 1973. Discussion of the Occurrence and Origin of Sedimentary Palygorskite-Sepiolite Deposits. Clays and Clay Minerals. Vol: 391-401.
- Lacherez-Bastin, S. 2005. Contribution à l'étude de la migration des nitrates dans le sol et la zone non saturée de la nappe de la craie dans le nord de la France. Modelisation intégrée des nitrates dans le bassin versant de l'Escrebieux. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique Universitaire de Lille. France. 191 p.

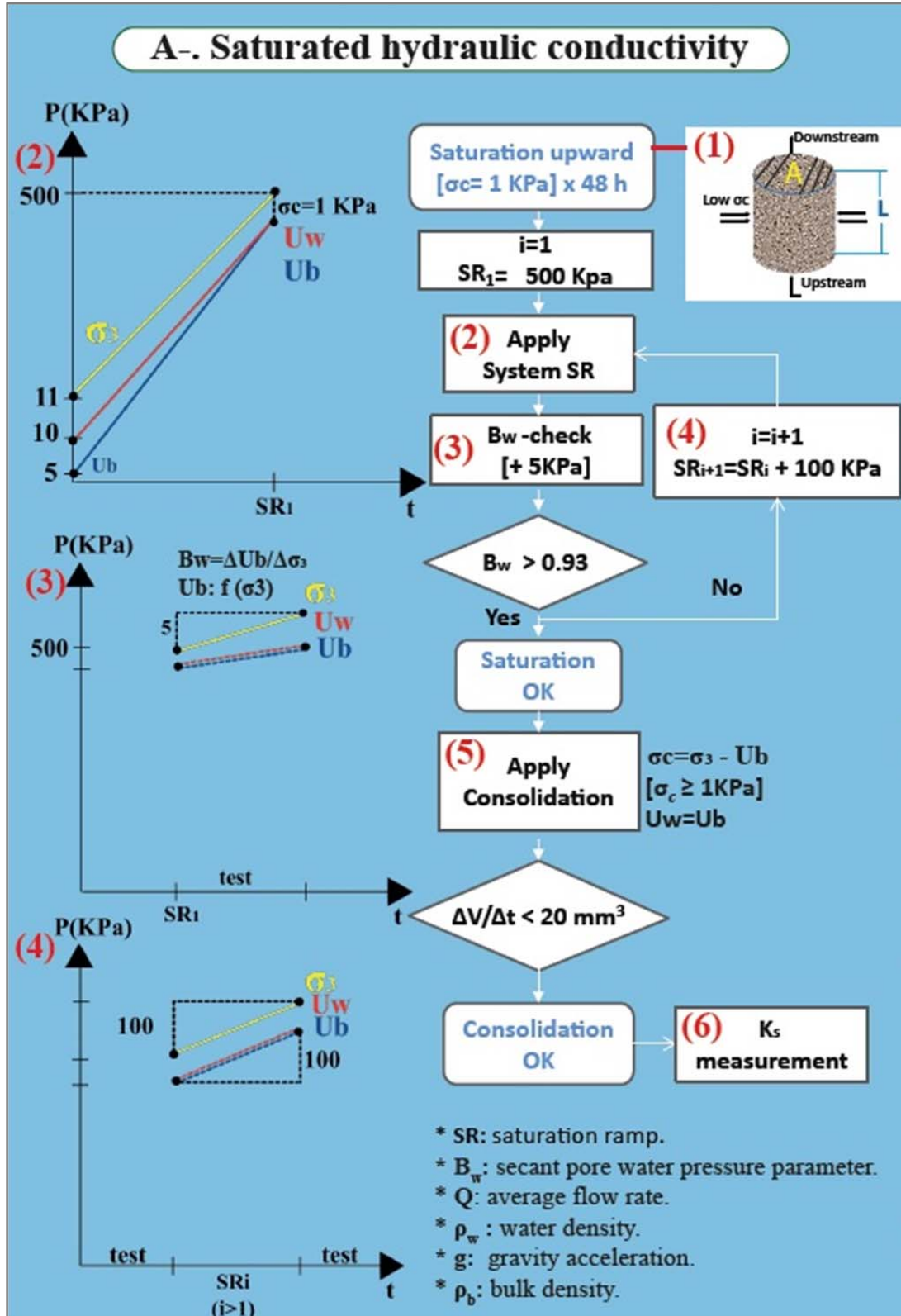
- Liu, H.-H. 2017. Fluid Flow in the Subsurface. History, Generalisation and Applications of Physical Laws. Springer, Aramco Research Center, TX, USA.
- Meter Environment. 2019. New WP4C Specifications. <https://www.metergroup.com/environment/products/wp4c/>.
- Meunier, A. 2005. Clays. 1st edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Meunier, A. 2013. Les argiles par la pratique. Cristallographie, minéralogie, géologie. Vuibert. France.
- Micromeritics. 2019. Products Macromeritics. AutoPore IV. <http://www.micromeritics.fr/Produits/AutoPore-IV.aspx>.
- Mualem, Y. 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resources Res. Vol: 513-522.
- Mualem, Y., et A. Klute. 1984. A Predictor-Corrector Method for Measurement of Hydraulic Conductivity and Membrane Conductance. Soil Science Society of America Journal. Vol: 993-1000.
- Ould Mohamed, S.A. 1995. Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce : application d'un modèle d'infiltration et incidence sur la lixiviation du nitrate. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France.
- Pennell, K.D. 2016. Specific Surface Area. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. 8p.
- Perkins, K.S. 2003. Measurement of Sedimentary Interbed Hydraulic Properties and Their Hydrologic Influence near the Idaho Nuclear Technology and Engineering Center at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Rapport n° 2003-4048. US Geological Survey. USA.
- Perkins, K., B.B. Mirus, et B.D. Johnson. 2014. Measurement of Unsaturated Hydraulic Properties and Evaluation of Property-Transfer Models for Deep Sedimentary Interbeds, Idaho National Laboratory. Idaho, USA.
- Quantachrome Instruments. 2012. NOVA®-e Series Models 25 and 26 NovaWin/NovaWin-CFR GAS SORPTION SYSTEM OPERATING MANUAL.
- Richards, L.. 1948. Porous Plate Apparatus for Measuring Moisture Retention and Transmission by Soil. US Salinity Laboratory, Riverside-California, USA.
- Rivera, J. 2004. Práctica de Ingeniería de yacimientos petrolíferos.
- Robert, M. 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Annales Agronomiques. 25 p: 363-399.

- Robert, M., et D. Tessier. 1974. Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Annales Agronomiques*. 26: 859-882.
- Sammartino, S. 1998. La caractérisation d'un matériau à faible perméabilité : mesures expérimentales et analyses d'images. Application à la tonalité du sud-Vienne, effet de l'altération. Thèse de doctorat. Université de Poitiers, France.
- Schnebelen, N. 2000. Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates: application à l'aquifère des Calcaires de Beauce, site de Villamblain. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 363 p.
- Schultze, B., W. Durner, et T. Zurmühl. 1999. State-of-the-Art in Inverse Modeling of Inflow/Outflow Experiments. *Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, Oct 22-24, 1997. Riverside, CA, USA. p: 661-681.
- Seguin, J.-J. 1987. Teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce. Modélisation et prévision. Rapport n° R 39598. BRGM, Orléans, France.
- Simunek, J., M. Sejna, M. Sakai, and M.Th. van Genuchten. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.16. University of California, Riverside-California, USA. 340 p.
- Sing K.S.W., Everett D.H, Haul R.A.W, Moscou L, Pierotti R.A, Rouquérol J, Siemienniewska T. 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Apply Chemistry*, Vol. 57, N° 4, 603-619.
- Smith, K.A., et C.E. Mullins. 2001. *Soil and environmental analysis: physical methods*. Marcel Dekker. New York, USA.
- Soilmoisture. Porous ceramics catalog.
- Sols Mesures. 2008. Manuel d'utilisation GDS Lab.
- Stenmans, V., J. Van Looy, et V. Fiquet. 2009. Introduction aux techniques de forage.VS. Presentation. 119 p.
- Tiab, D., et E. Donaldson. 2004. *Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Second edition. Elsevier. 889 p.
- Tindall, J., et J. Kunkel. 1999. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Prentice Hall. New Jersey, US.

- Tokunga, T.K., J. Wan, 1997. Water film flow along fracture surfaces of porous rock. *Water Ressources Research*, 33(6): vol: 1287-1295.
- Trautmann, F. 1974. Les formations du groupe de Beauce. Aquitanien du bassin de Paris. Caracteristiques et utilisations. Rapport n° 74 SGN 358 BSS. BRGM, Orléans, France.
- van Dam, J., J.N. Stricker, et P. Droogers. 1994. Inverse Method to Determine Soil Hydraulic Functions from Multistep Outflow Experiments. *Soil Science Society of America Journal*. Vol: 647-652.
- van der Kruk, J., J. Vanderborght, H. Huisman, et H. Vereecken. 2017. The Krauthausen Test Site (setup in 1993). Présentation:. Forschungszentrum Jülich, Germany. 16 p.
- van Genuchten, M.T. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol: 892-898.
- van Genuchten, M.TH., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Rapport n° EPA/600/2-91/065. US Salinity Laboratory. Riverside-California, USA. 93p.
- Vereecken, H., U. Döring, H. Hardelauf, U. Jaekel, U. Hashagen, O. Neuendorf, H. Schwarze et R. Seidemann. 2000. Analysis of solute transport in a heterogeneous aquifer: the Krauthausen field experiment. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol: 329-358.
- Viel, E. 2016. Etude des processus de transport des solutés hors équilibre physique. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 265 p.
- Webb, P.A. 1993. Data collection, reduction and presentation. International sales support document. PoreSizer 9320-AutoPore II 9220. Micromeritics.
- Wendroth, O., W. Ehlers, H. Kage, J.W. Hopmans, J. Halbertsma et J. H. M. Wösten. 1993. Reevaluation of the Evaporation Method for Determining Hydraulic Functions in Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol: 1436-1443.
- Winfield, K. 2000. Factors controlling water retention of alluvial deposits, Western Mojave Desert. Master thesis. San Jose State University. California, USA. 99 p

ANNEXES

Annexe 8-1 :



Annexe 8-1 Schéma du protocole de saturation et de la mesure de K_{sat} avec le système triaxial.

Annexe 8-2 :

Station 1, Test Stage Number 1

About Help

Test Type: B-Check

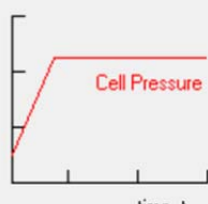
B-Check:

B-Check

Current Cell Pressure: 0 kPa

Current Pore Pressure: 0 kPa

Target Cell Pressure: kPa



Remove Stage From List < Back Next >

a.

Station 1, Test Stage Number 8

About Help

Optional Test Termination Conditions:

☐ End of Saturation Ramp
Stop the test when the saturation ramp is complete

☐ End of Consolidation when volume changes < 0 mm3 in 0 mins
Stop the test if the back volume change is less than the specified rate

☒ Max Skempton B-Value 0.93
After 5 minutes if selected B-value is exceeded the test will stop

☐ Hold Pressures at end of test
At end of test, send a final target pressure (not hold volume)

☐ Maximum Test Length = 60 minutes
Stop the test after 'x' minutes in the current stage

☒ Go to next stage automatically ☐ Wait for user interaction

Remove Stage From List < Back Next >

b.

Annexe 8-2 Module « B-check ». Contrôle de B et critères de l'essai.

Annexe 8-3 :

Station 1, Test Stage Number 10

About Help

Test Type: Consolidation

Consolidation

Consolidation

	Current:	Target:	
Cell Pressure:	506	584	kPa
Back Pressure:	500	505	kPa

☐ Use current Back Pressure value for target?
☐ Use wet-wet for control if available

Remove Stage From List < Back Next >

a.

Station 1, Test Stage Number 10

About Help

Optional Test Termination Conditions:

☐ End of Saturation Ramp
 Stop the test when the saturation ramp is complete

☒ End of Consolidation when volume changes < 20 mm³ in 5 mins
 Stop the test if the back volume change is less than the specified rate

☐ Max Skempton B-Value: 0.95
 After 5 minutes if selected B-value is exceeded the test will stop

☐ Hold Pressures at end of test
 At end of test, send a final target pressure (not hold volume)

☐ Maximum Test Length = 60 minutes
 Stop the test after 'x' minutes in the current stage

☒ Go to next stage automatically ☐ Wait for user interaction

Remove Stage From List < Back Next >

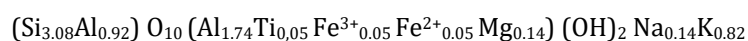
b.

Annexe 8- 3 Module de consolidation et critères de l'essai (GDS Lab Handbook).

Annexe 9-1 :

Oxyde	% Ox	M _m (g/mol)	Nb _{m-cat}	Nb _o	Nb _{cat} (n°O) (12 Ox)	Nb _{cat} (n°O) (11 Ox)
SiO ₂	46,17	60,09	768,3	(x2) 1536,6	3,07	3,08
TiO ₂	1,07	79,89	13,4	(x2) 26,8	0,04	0,05
Al ₂ O ₃	33,85	50,98	664,0	(x3/2) 996,0	2,65	2,66
Fe ₂ O ₃	0,99	79,85	12,4	(x3/2) 18,6	0,05	0,05
FeO	0,99	71,85	13,8	(x1) 13,8	0,05	0,05
MgO	1,44	40,31	35,7	(x1) 35,7	0,14	0,14
Na ₂ O	1,08	30,99	34,8	(x1) 17,4	0,14	0,14
K ₂ O	9,60	47,1	203,8	(x1/2) 101,9	0,82	0,82
H ₂ O	4,52	9	502,2	(x1/2) 251,1	2,01	-
				Total 12 eq 2997,9		
				Total 11 eq 2746,8		

Différences négligeables entre les calculs en base 12 ou 11 :

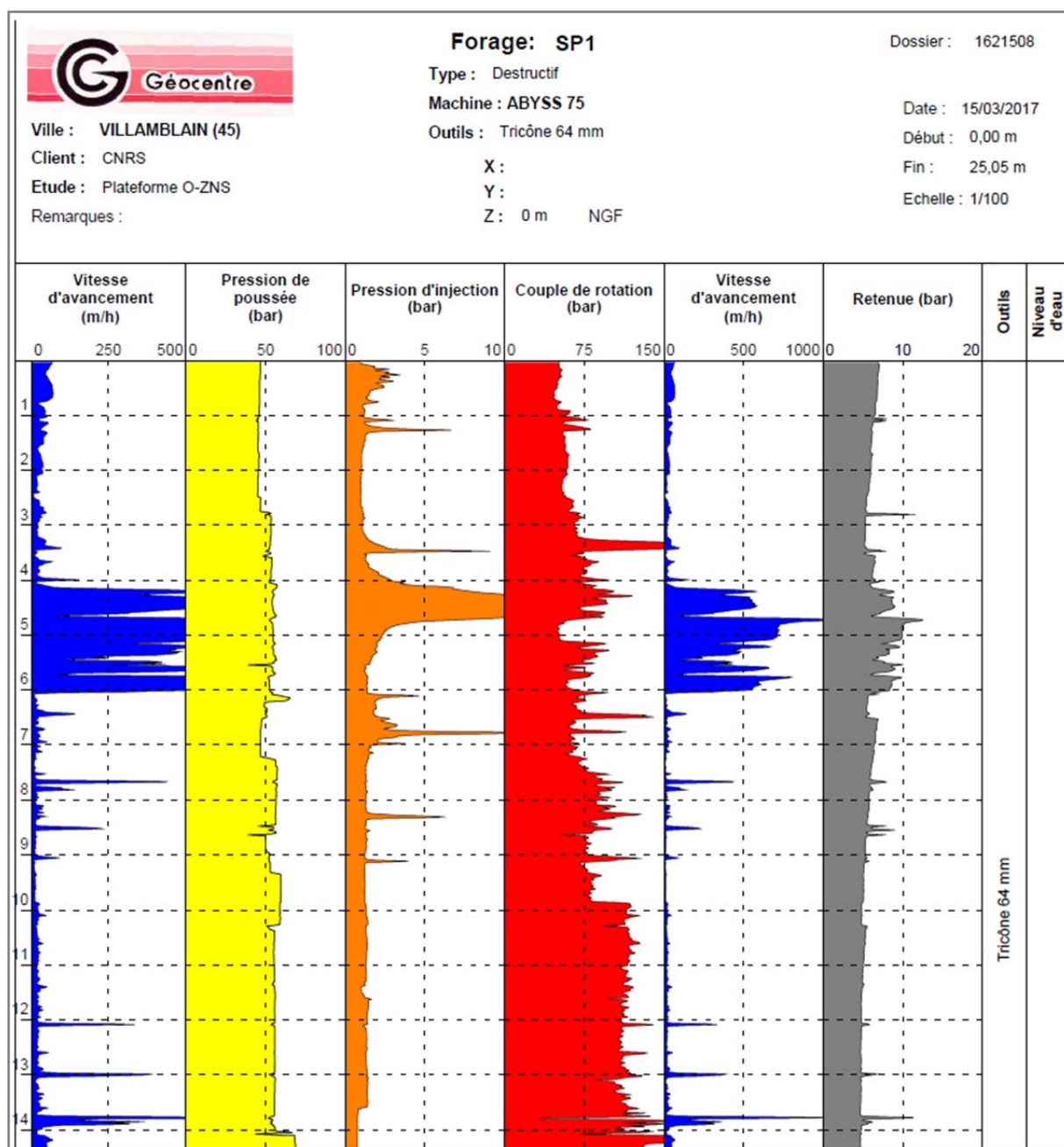


Vérification : taux d'occupation des sites tétraédriques et octaédriques et neutralité électrique.

Couche	Occupation des sites		Charges électriques	
	théorique	mesurée	théorique	mesurée
tétraédrique	4	4,00	X	-0,92
octaédrique	2	2,03	Y	-0,05
cations interfoliaires	1 max	0,96	z	+0,95

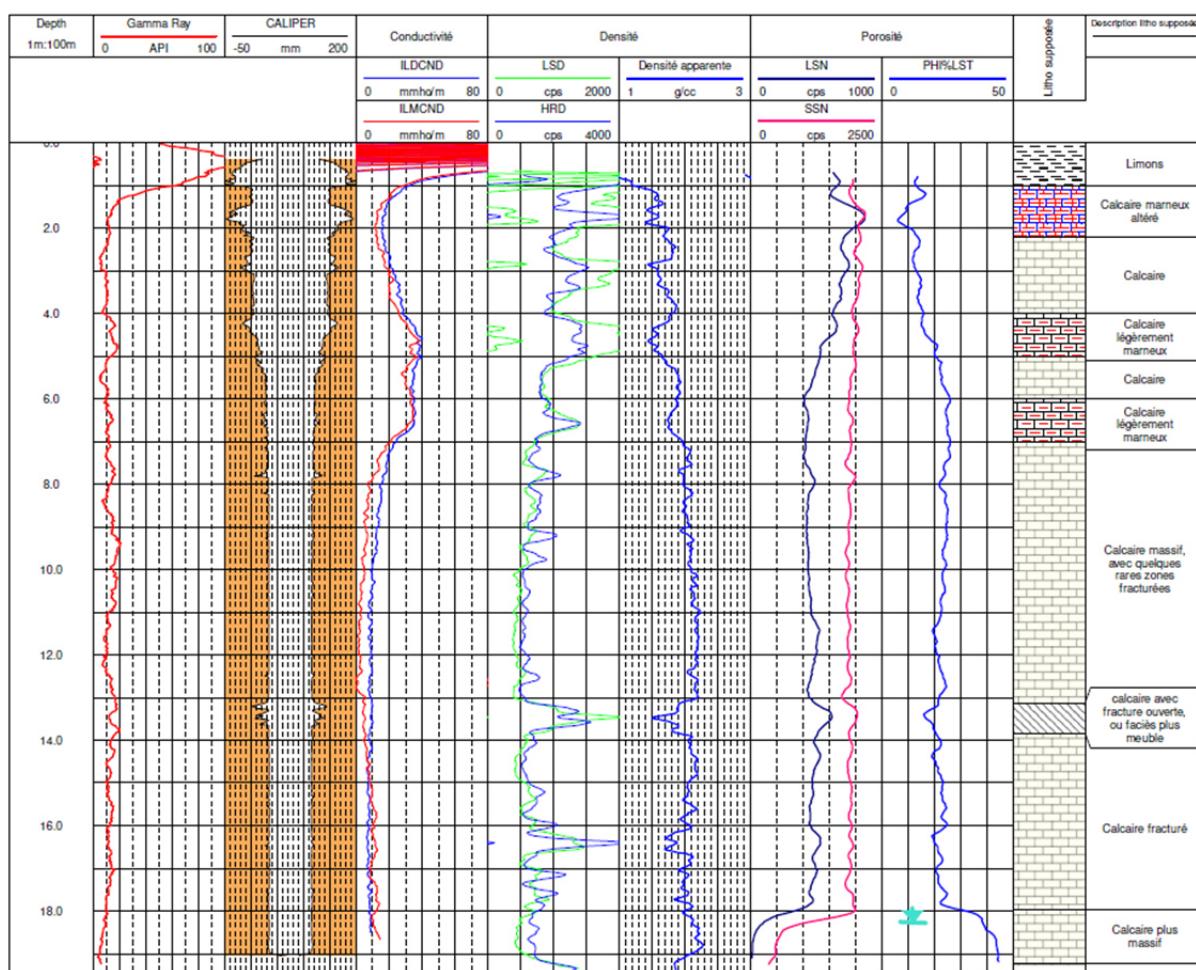
Annexe 9- 1 Exemple de calcul de demi-formule unité d'un phyllosilicate de type 2 : 1 : bases de calcul « non déshydratées » :12 ;
« déshydratées » :11 (Meunier, 2013).

Annexe 10-1:



Annexe 10-1 Données obtenues lors de l'essai pressiométrique.

Annexe 10-2 :



Annexe 10- 2 Diagrammes du sondage carotté SC1.

Annexe 11- 1 : Photos des carottes

* Commentaire : Dans les annexes, l'intervalle de profondeur de chaque carotte est identifié selon les cotes établis par le foreur, malgré les pertes de matériaux lors du prélèvement.

Photos du SC1



Sondage carotté 1 – échantillon intact 1 (SC1-EI1) : 0 à 0,8 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 2 (SC1-EI2) : 0,8 à 1,7 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 3 (SC1-EI3) : 1,7 à 3,2 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 4 (SC1-EI4) : 3,2 à 4,7 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 5 (SC1-EI5) : 4,7 à 5,7 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 6 (SC1-EI6) : 5,7 à 6,7 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 7 (SC1-EI7) : 6,7 à 6,9 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 8 (SC1-EI8) : 6,9 à 8,5 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 9 (SC1-EI9) : 8,5 à 10,10 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 10 (SC1-EI10) : 10,10 à 11,7 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 11 (SC1-EI11) : 11,7 à 13,3 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 12 (SC1-EI12) : 13,3 à 14,9 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 13 (SC1-EI13) : 14,9 à 16,5 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 14 (SC1-EI14) : 16,5 à 18,1



Sondage carotté 1 – échantillon intact 15 (SC1-EI15) : 18,1 à 19,20 m



Sondage carotté 1 – échantillon intact 16 (SC1-EI16) : 19,20 à 20 m

Photos du SC2



Sondage carotté 2 – échantillon intact 1 (SC2-EI1) : 0 à 1,25 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 2 (SC2-EI2) : 1,5 à 2,75 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 3 (SC2-EI3) : 3 à 4 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 4 (SC2-EI4) : 3,6 à 4,6 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 5 (SC2-EI5) : 4,6 à 6 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 6 (SC2-EI6) : 6 à 7 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 7 (SC2-EI7) : 7 à 8 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 8 (SC2-EI8) : 8 à 9 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 9 (SC2-EI9) : 9 à 10 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 10 (SC2-EI10) : 10 à 11 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 11 (SC2-EI11) : 11 à 12 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 12 (SC2-EI12) : 12 à 13 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 13 (SC2-EI13) : 13 à 14 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 14 (SC2-EI14) : 14 à 15 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 15 (SC2-EI15) : 15 à 16 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 16 (SC2-EI16) : 16 à 17 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 17 (SC2-EI17) : 17 à 18 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 18 (SC2-EI18) : 18 à 19 m



Sondage carotté 2 – échantillon intact 19 (SC2-EI19) : 19 à 20 m

Photos du SC3



Sondage carotté 3 – échantillon intact 1 (SC3-EI1) : 0 à 1 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 2 (SC3-EI2) : 1 à 2 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 3 (SC3-EI3) : 2 à 3 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 4 (SC3-EI4) : 3 à 4 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 5 (SC3-EI5) : 4 à 5 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 6 (SC3-EI6) : 5 à 6 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 7 (SC3-EI7) : 6 à 7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 8 (SC3-EI8) : 7 à 8 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 9 (SC3-EI9) : 8 à 9 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 10 (SC3-EI10) : 9 à 9,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 11 (SC3-EI11) : 9,7 à 10,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 12 (SC3-EI12) : 10,7 à 11,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 13 (SC3-EI13) : 11,7 à 12,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 14 (SC3-EI14) : 12,7 à 13,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 15 (SC3-EI15) : 13,7 à 14,7 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 16 (SC3-EI16) : 14,7 à 15,8 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 17 (SC3-EI17) : 15,8 à 17 m



Sondage carotté 3 – échantillon intact 18 (SC3-EI18) : 17 à 18 m



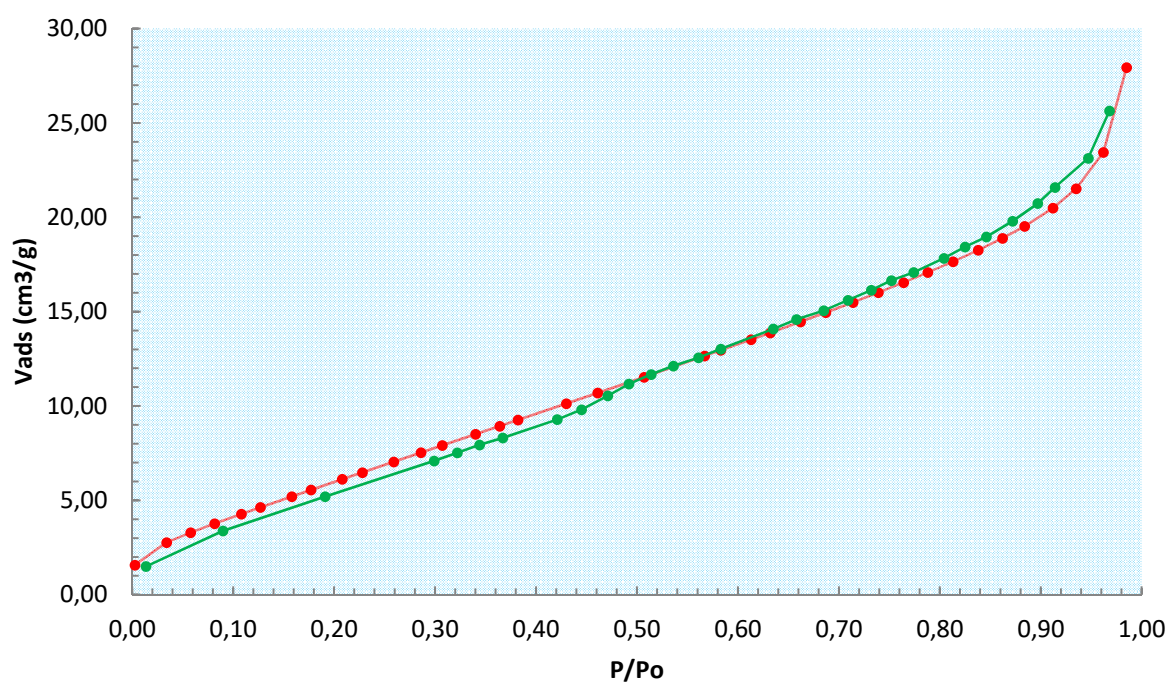
Sondage carotté 3 – échantillon intact 19 (SC3-EI19) : 18 à 19 m



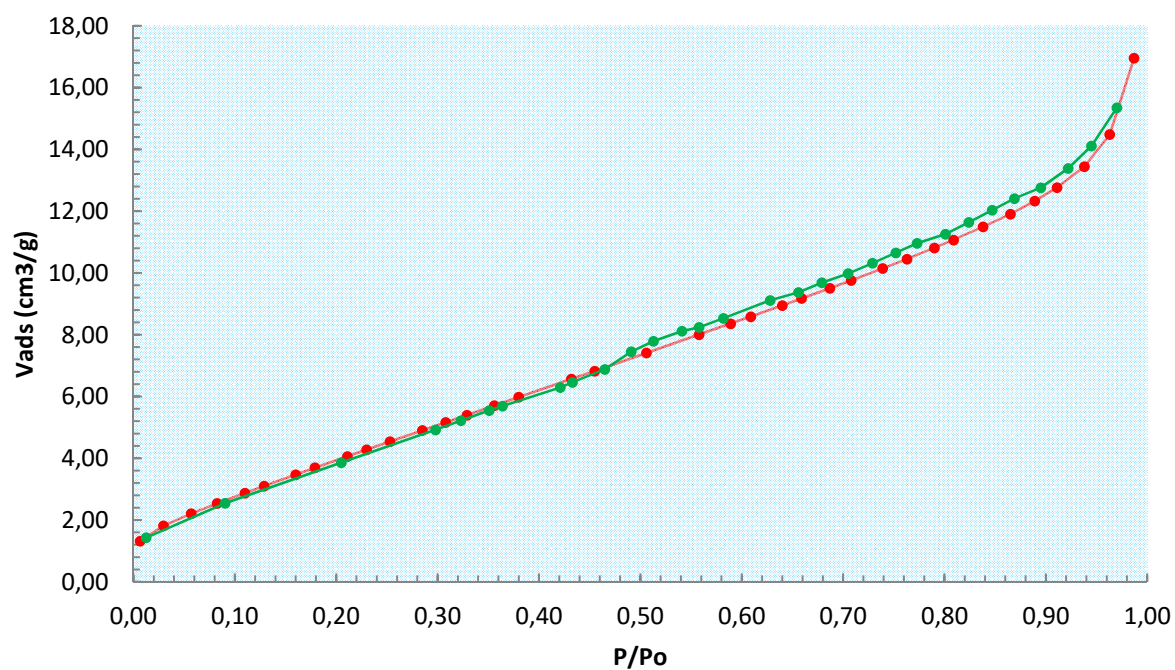
Sondage carotté 3 – échantillon intact 20 (SC3-EI20) : 19 à 20 m

Annexe 12- 1 : Courbes de sorption isothermique

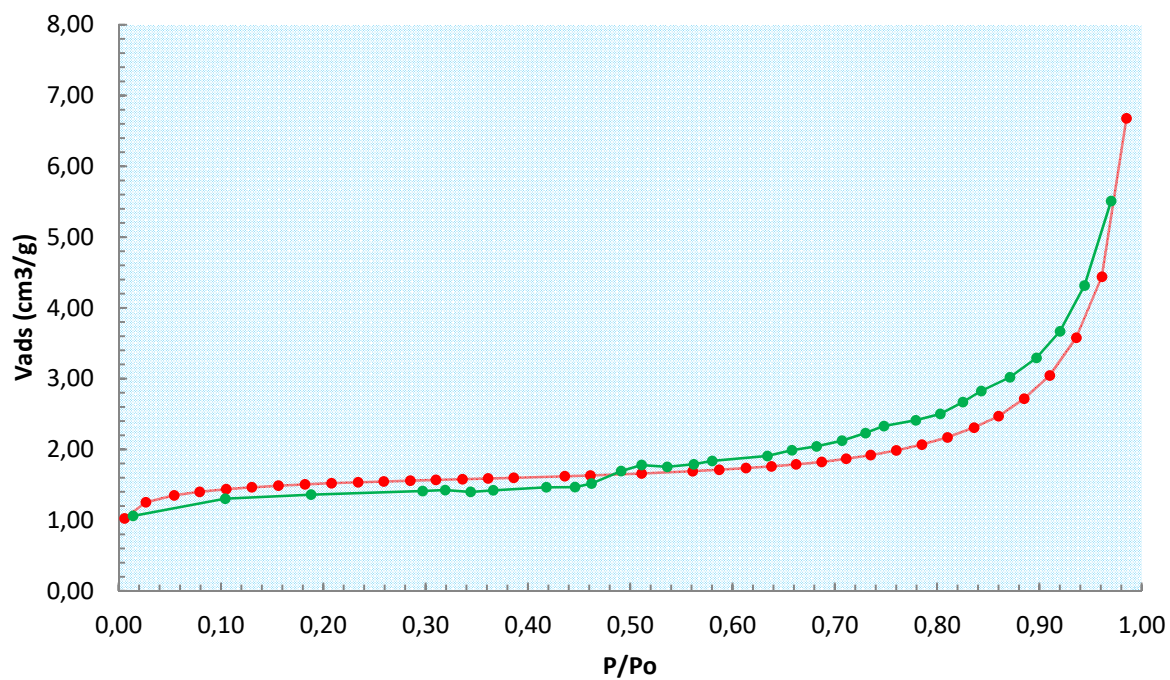
Sorption isothermique des échantillons du SC1



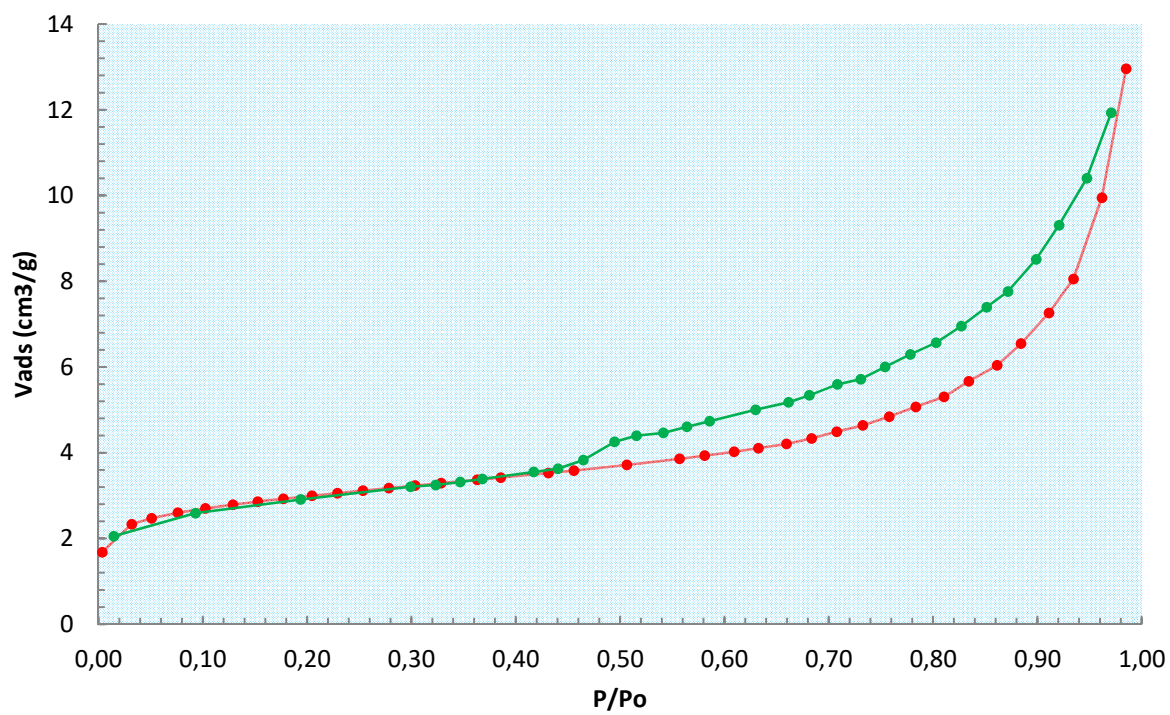
Echantillon : 1,2-1,3 m-SC1



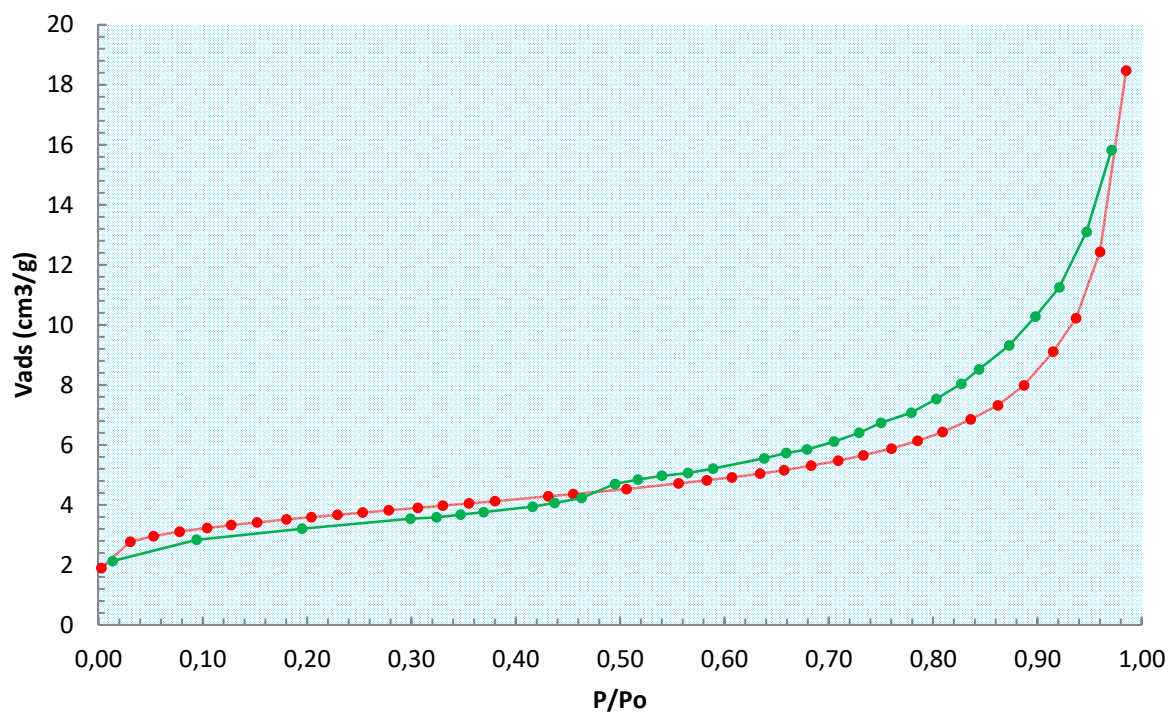
Echantillon : 3,3-3,4 m-SC1



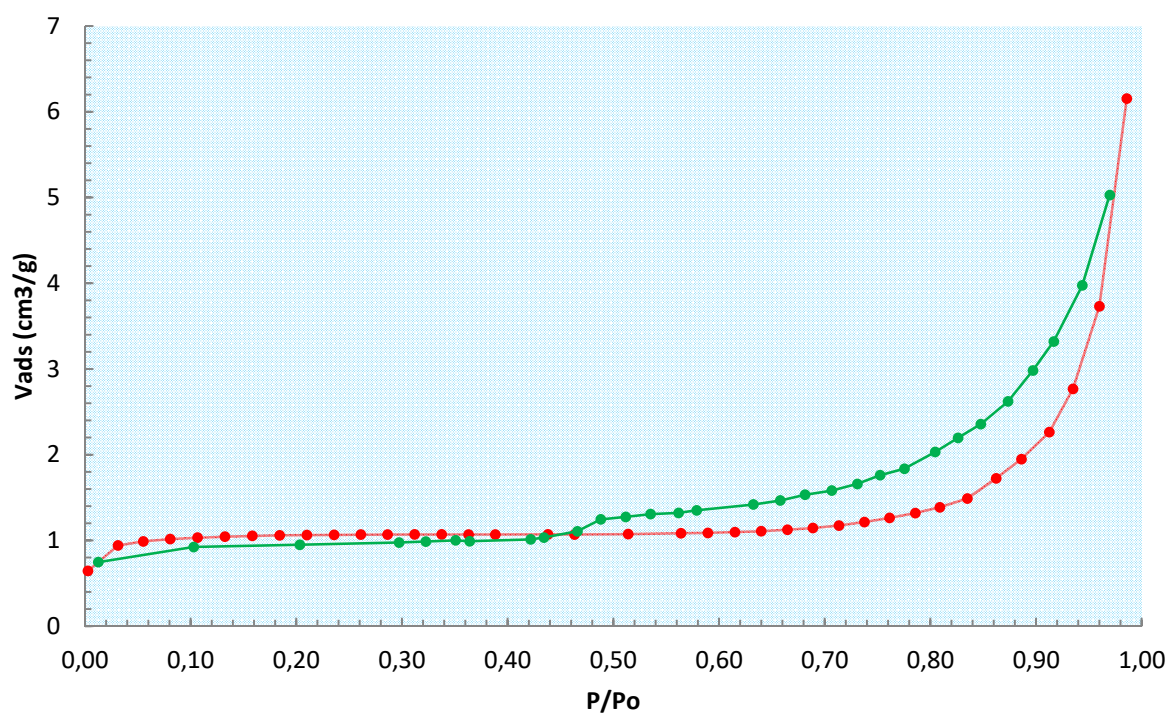
Echantillon : 4,2-4,3 m-SC1



Echantillon : 4,9-5-SC1

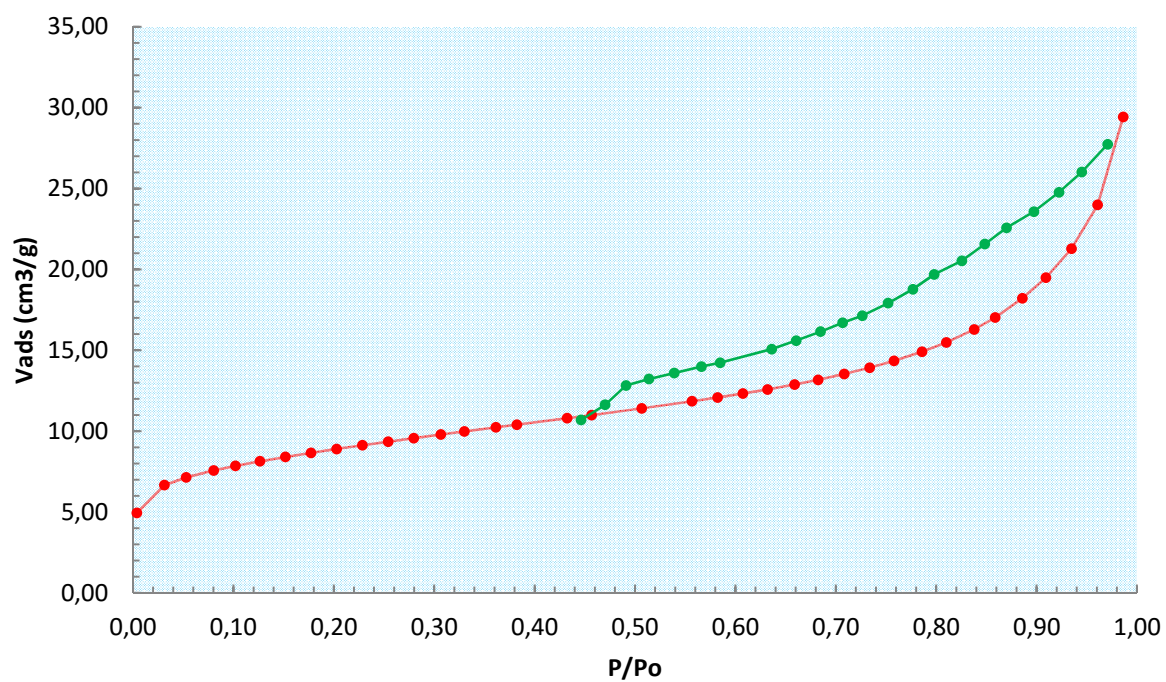


Echantillon : 5,4-5,5 m-SC1

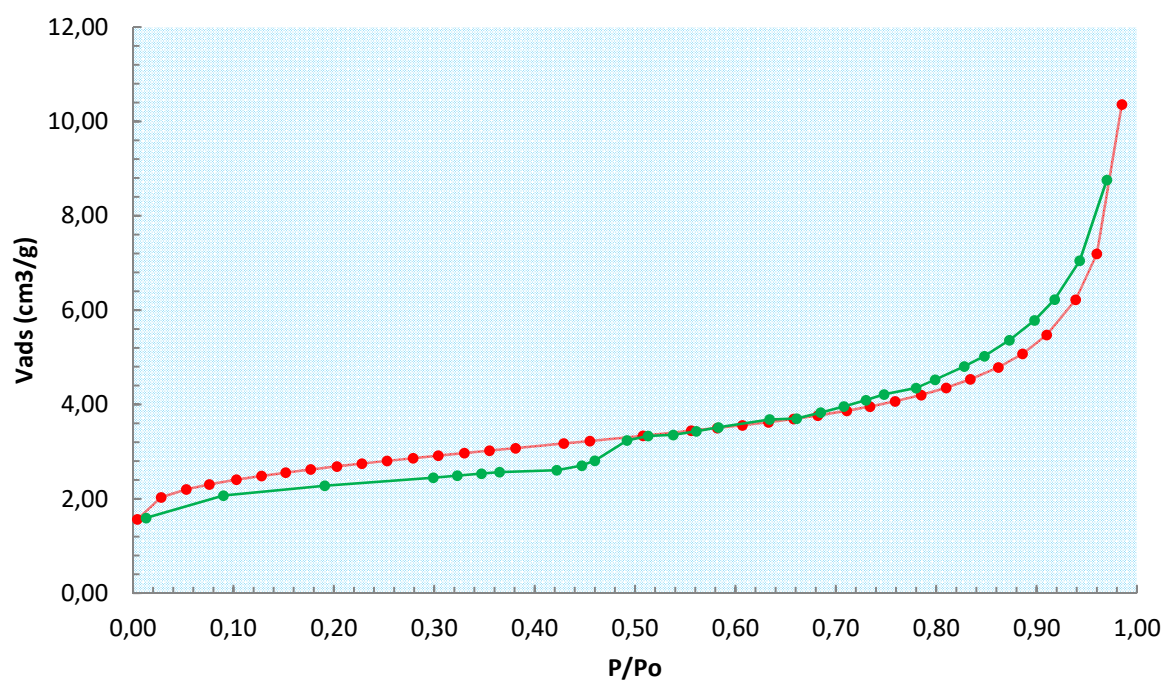


Echantillon : 5,9-5,97 m-SC1

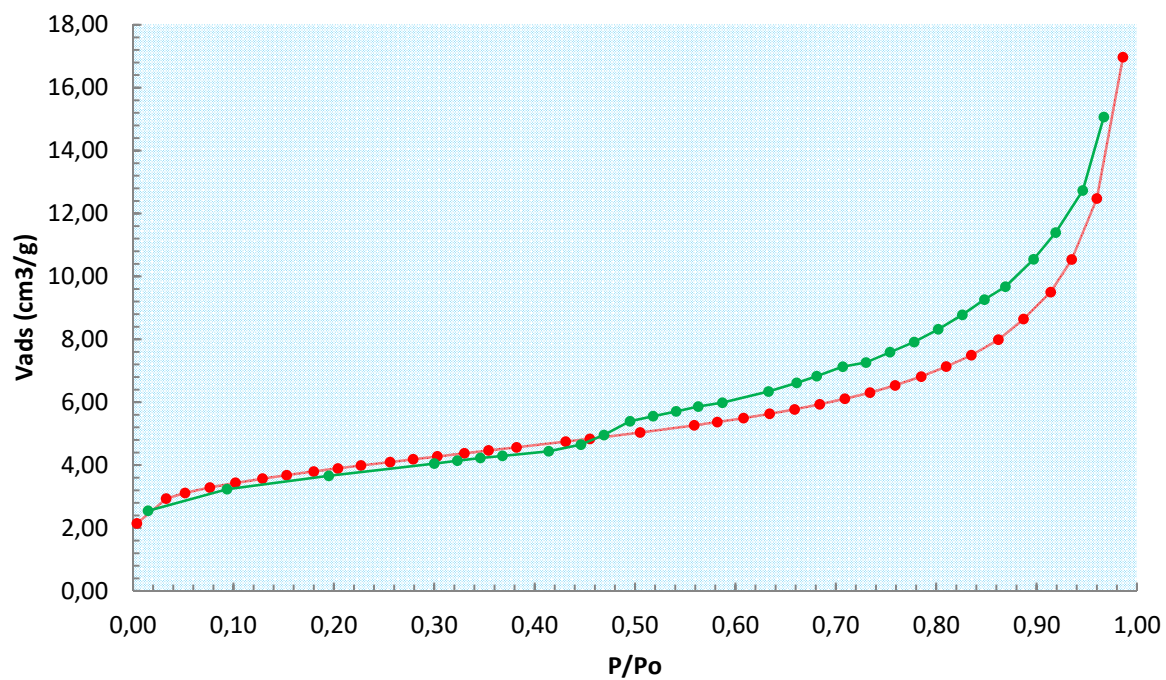
Sorption isothermique des échantillons du SC2



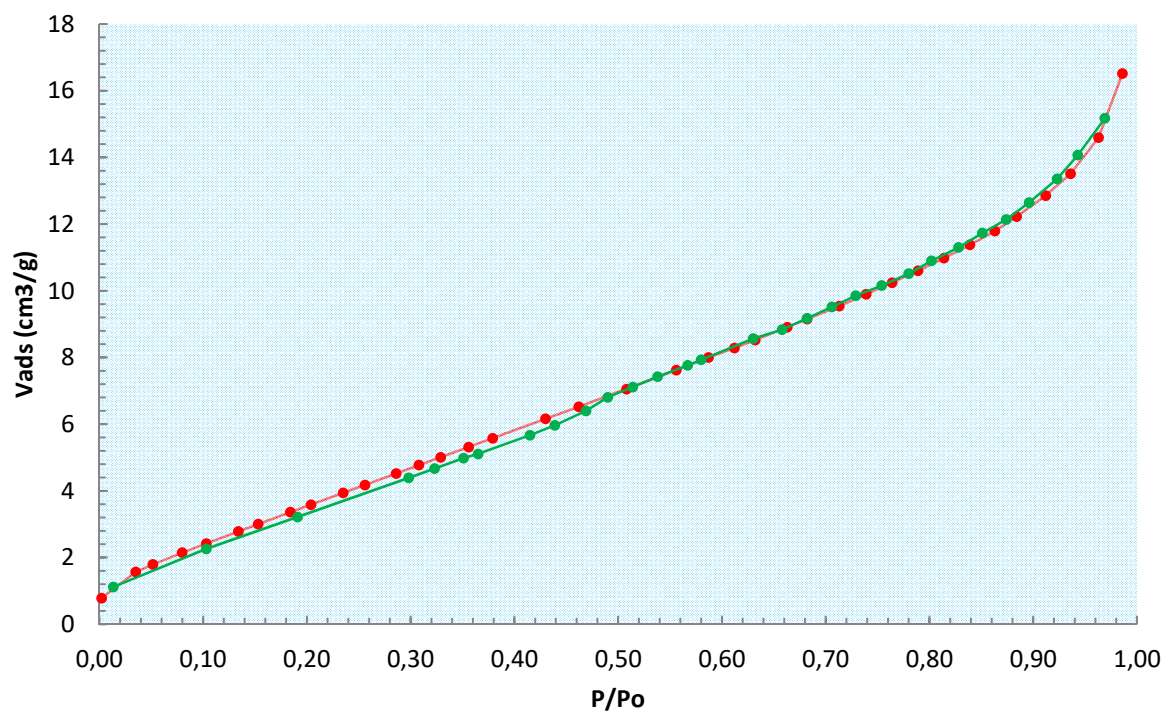
Echantillon : 50-60 cm-SC2



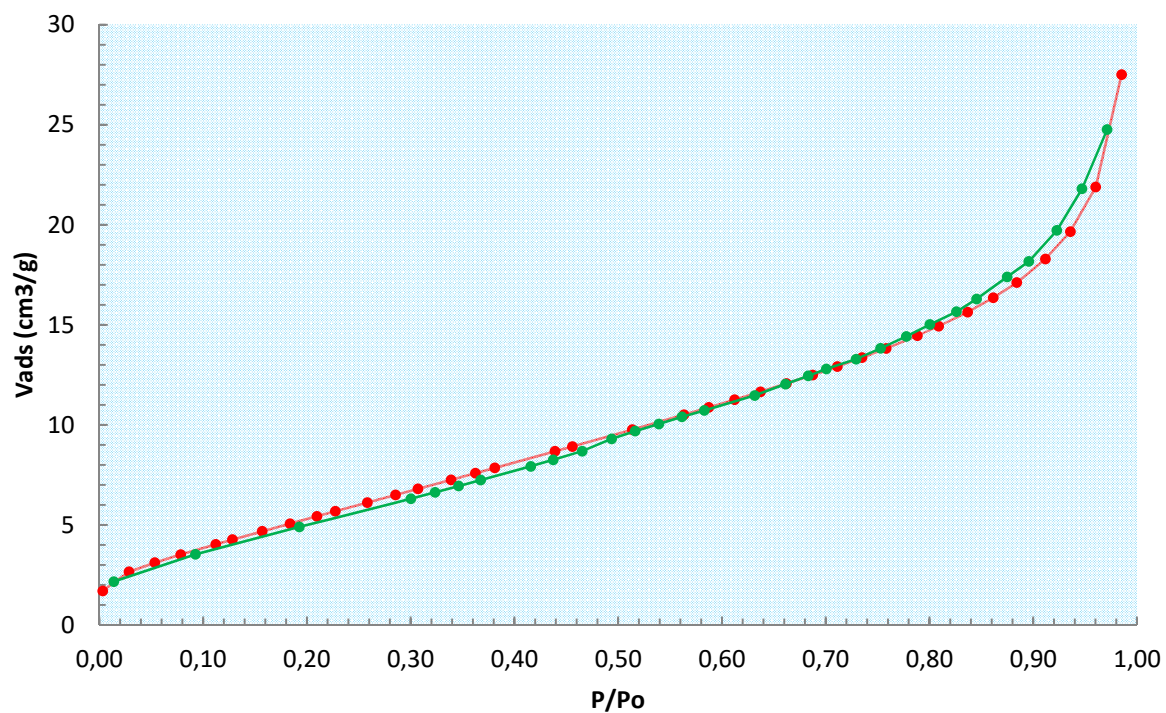
Echantillon : 1,2-1,3 m-SC2



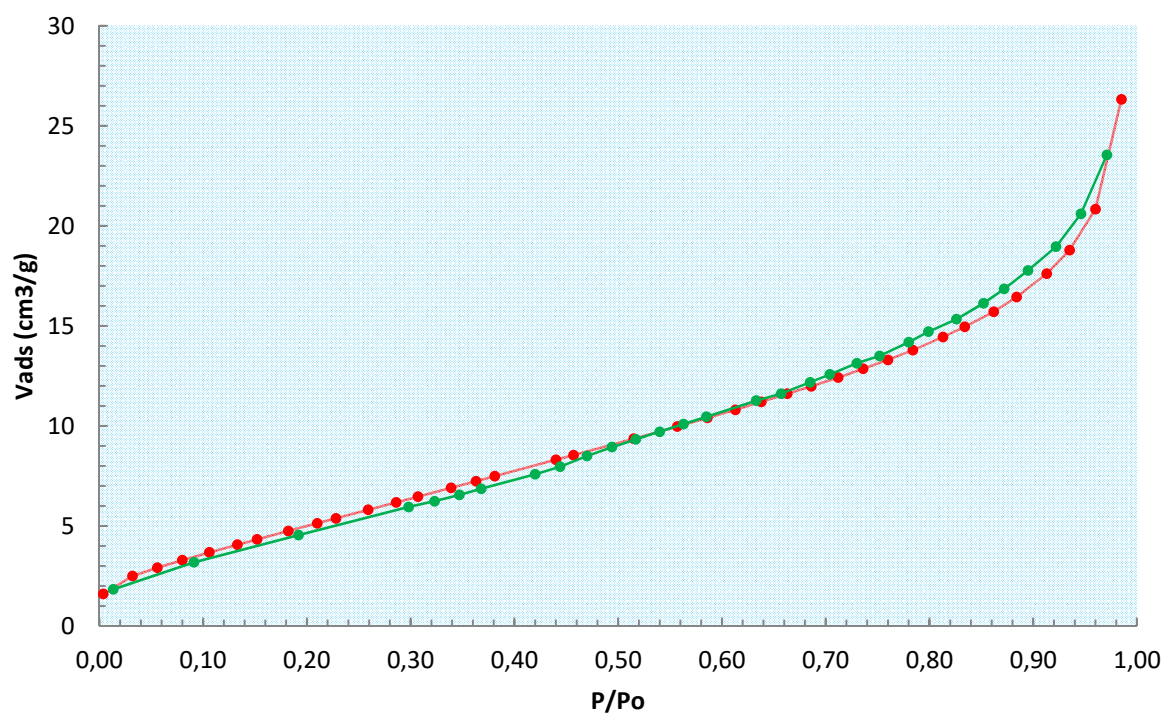
Echantillon : 1,5-1,6 m-SC2



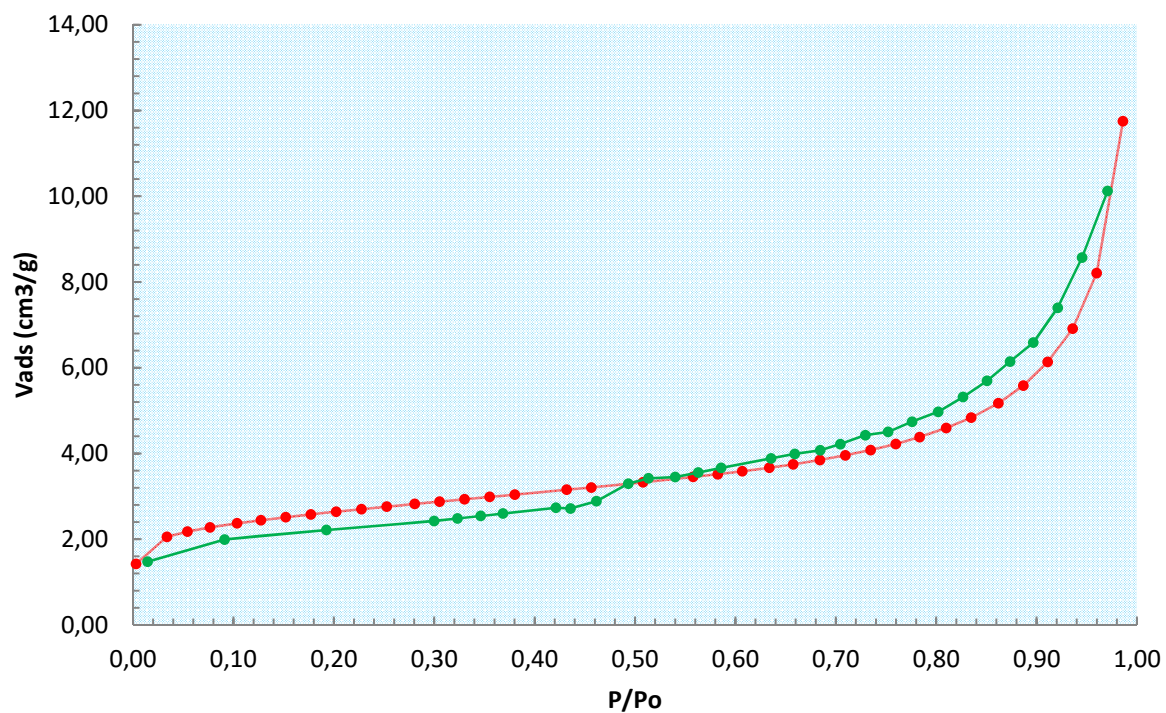
Echantillon : 2,7-2,8 m-SC2



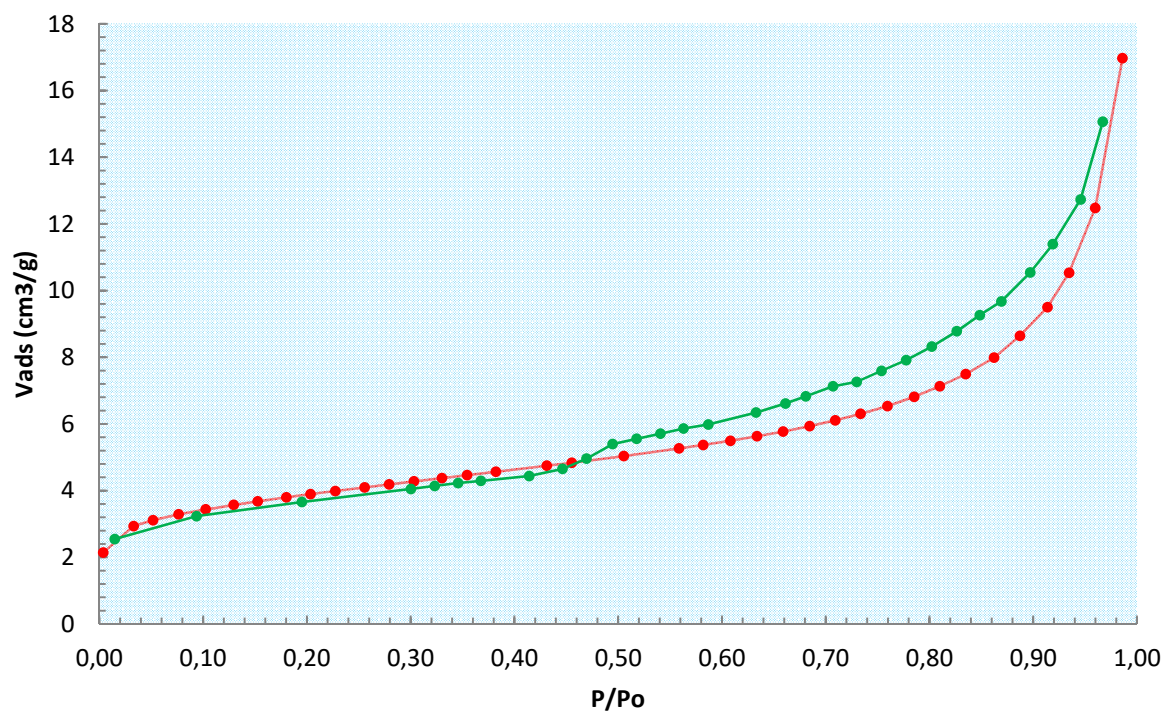
Echantillon : 3,9-4 m-SC2



Echantillon : 4,8-5 m-SC2

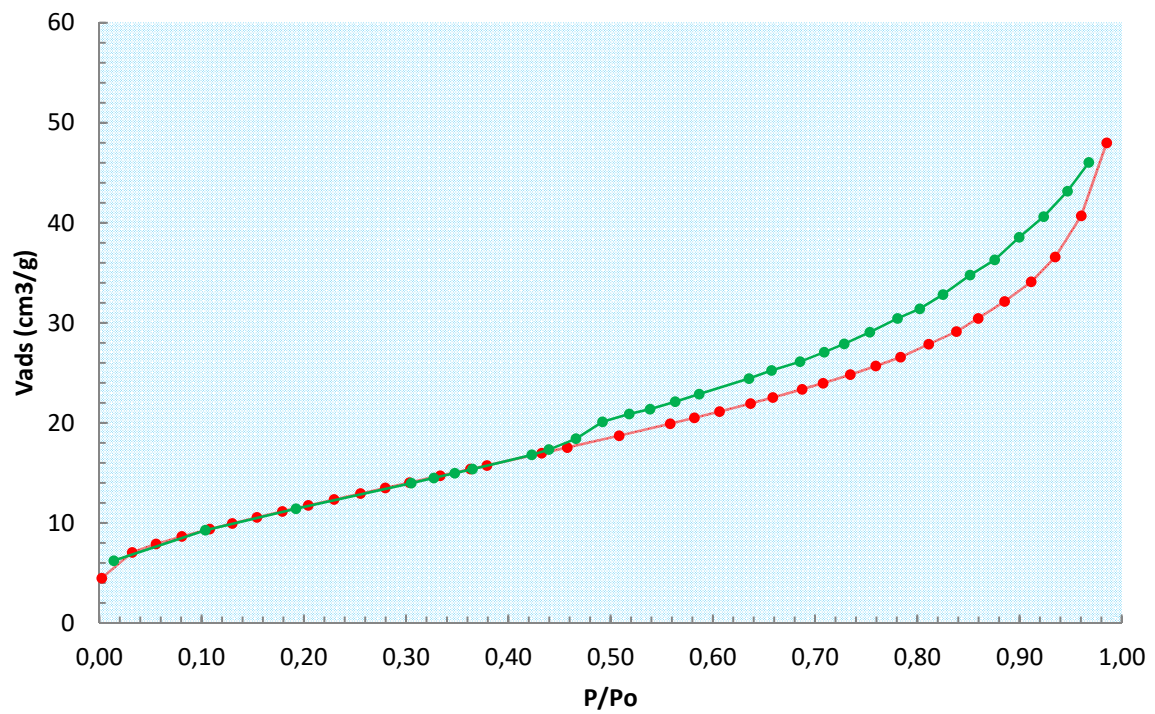


Echantillon : 5,3-5,4 m-SC2

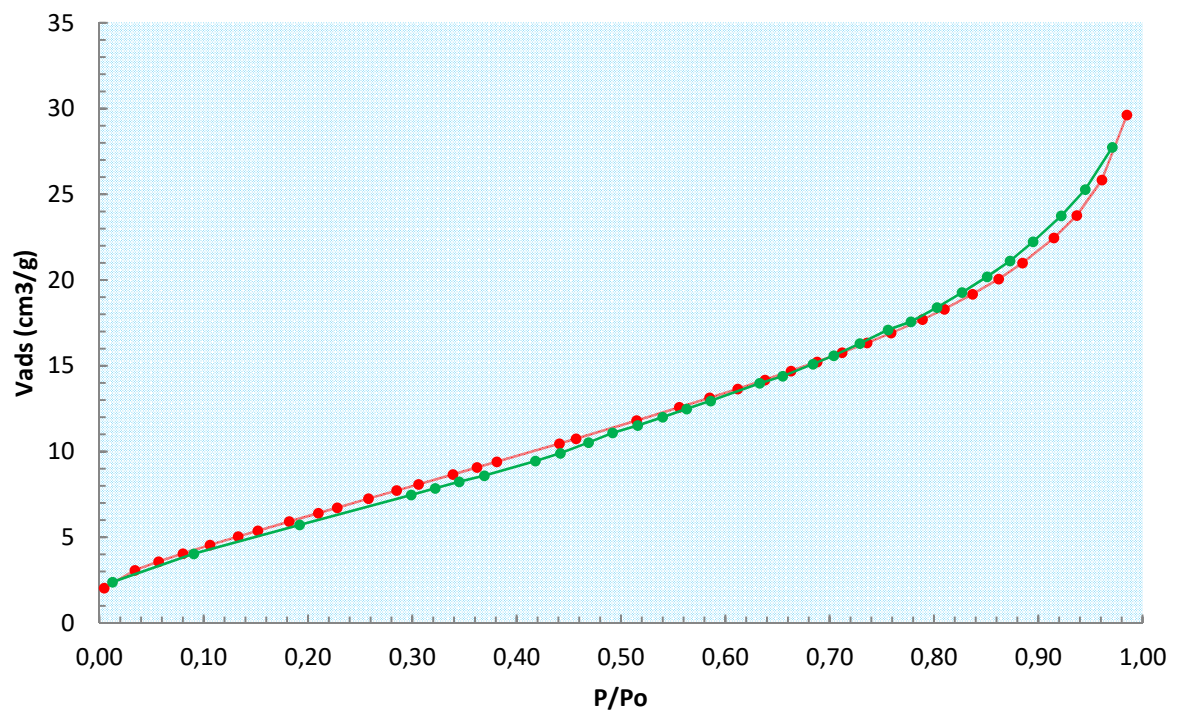


Echantillon : 6,15-6,25 m-SC2

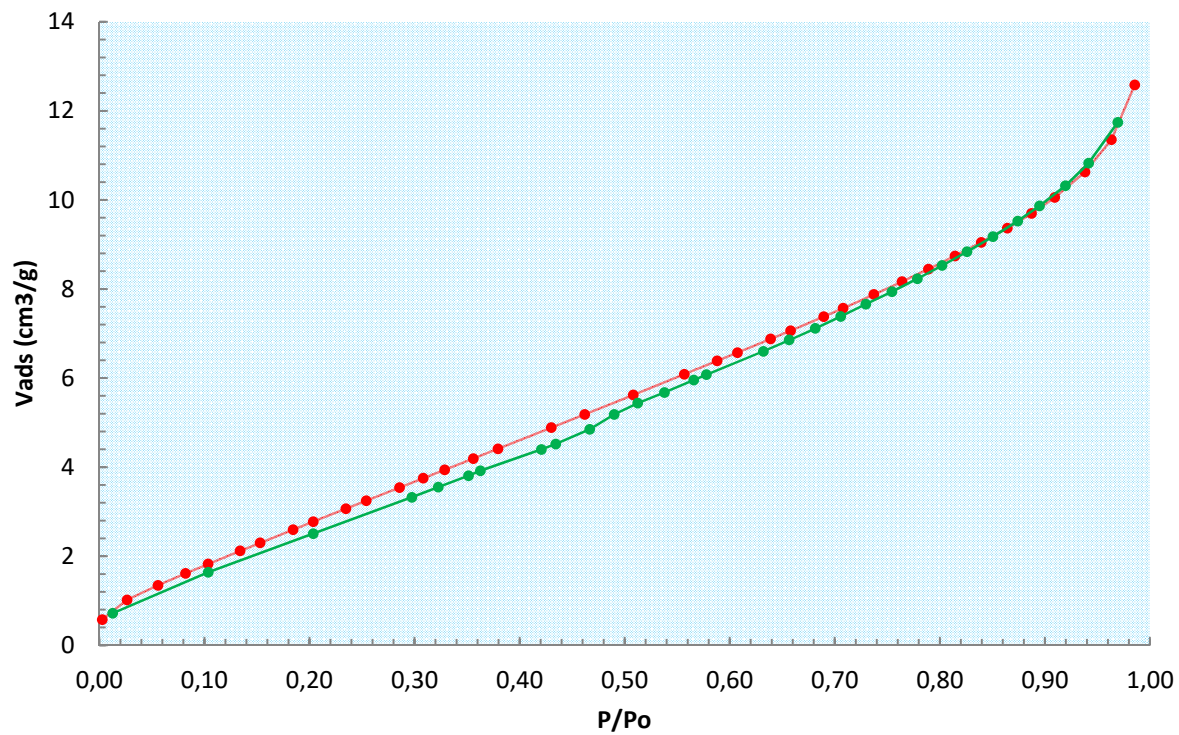
Sorption isothermique des échantillons du SC3



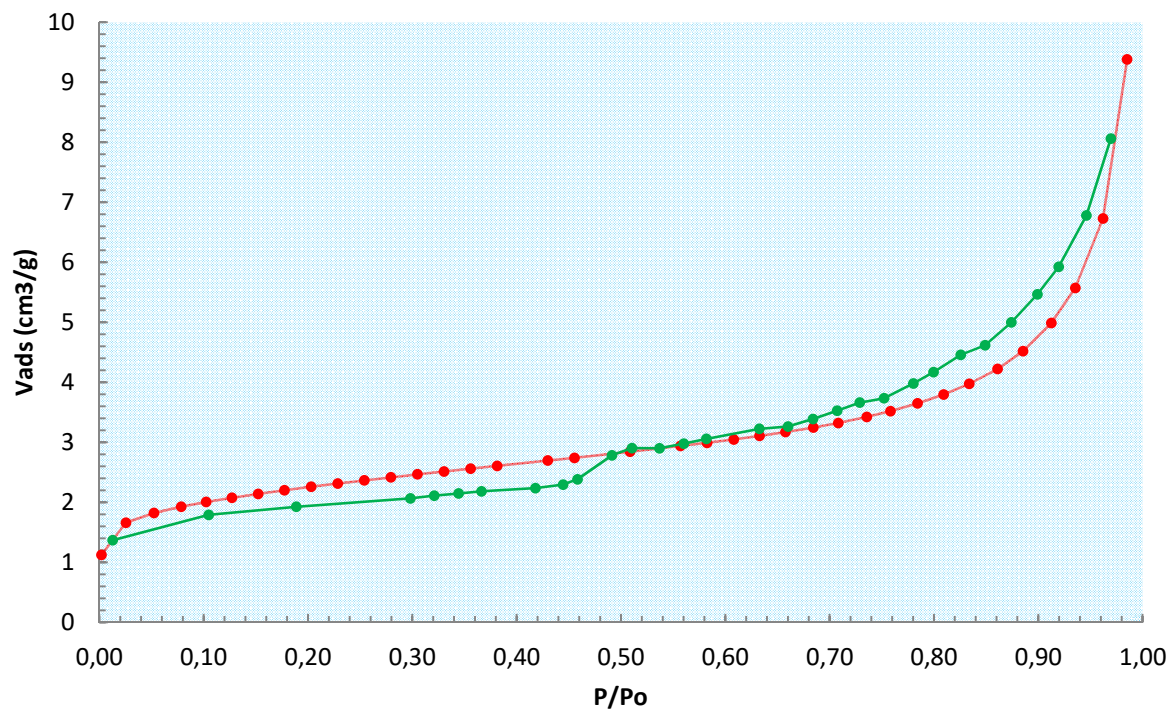
Echantillon : 1,4-1,5 m-SC3



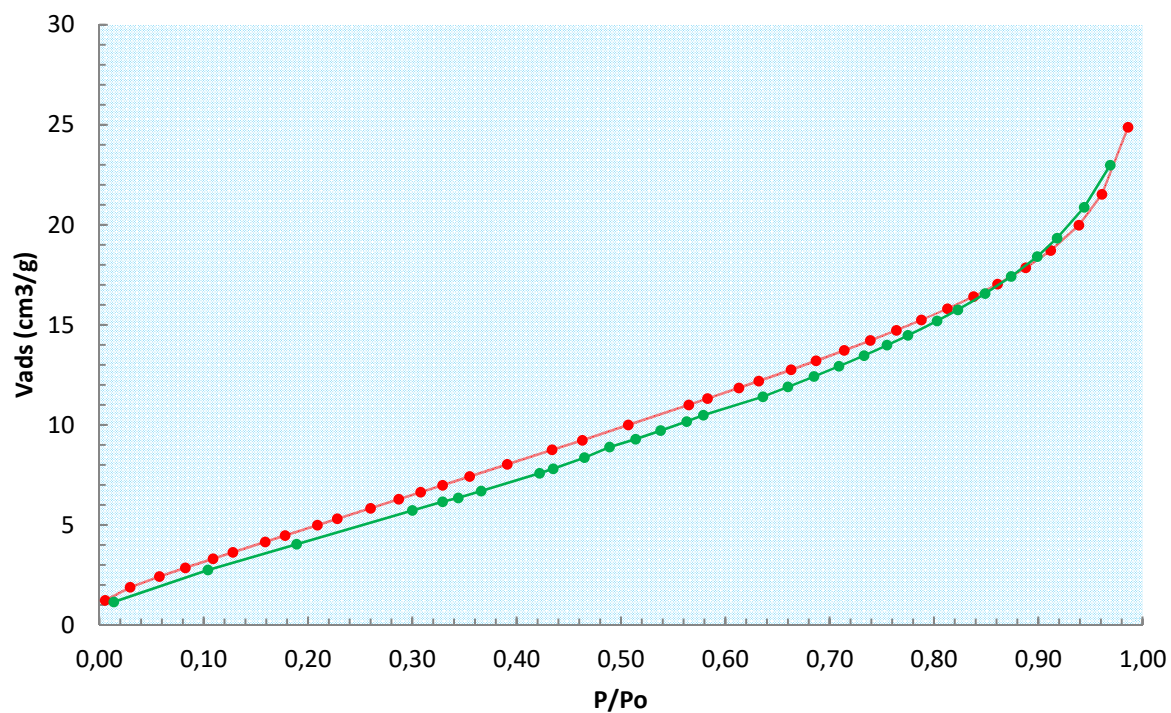
Echantillon : 1,82-1,9 m-SC3



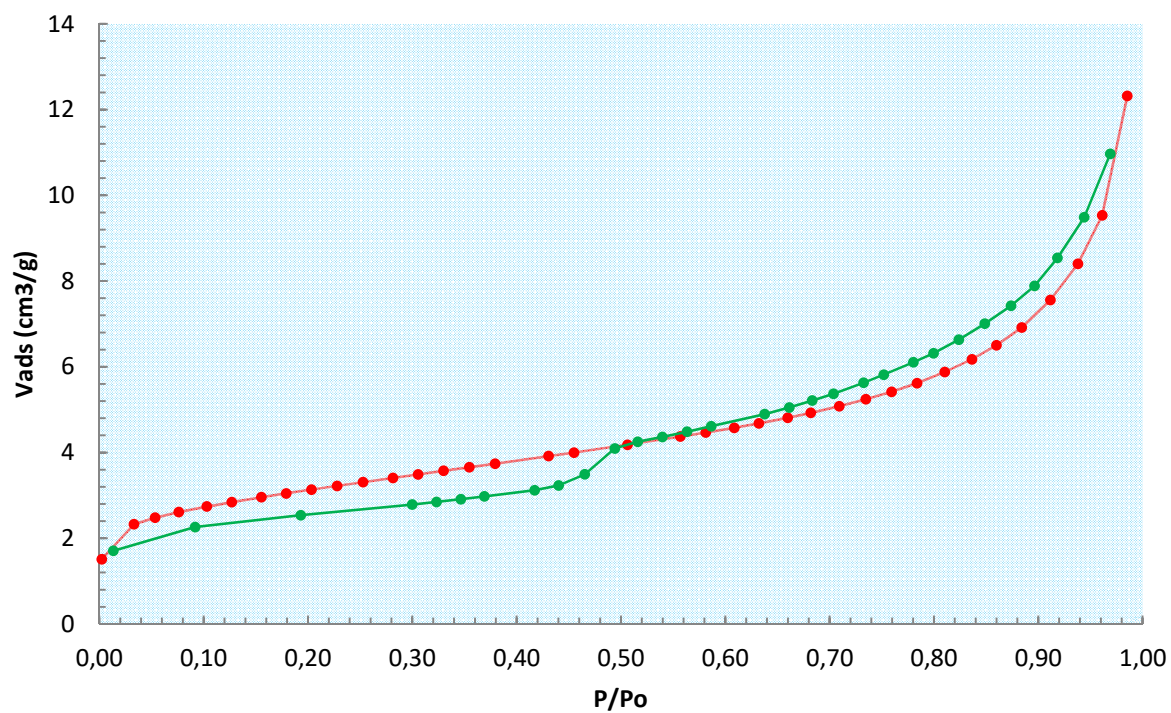
Echantillon : 2,58-2,6 m-SC3



Echantillon : 4,2-4,25 m-SC3



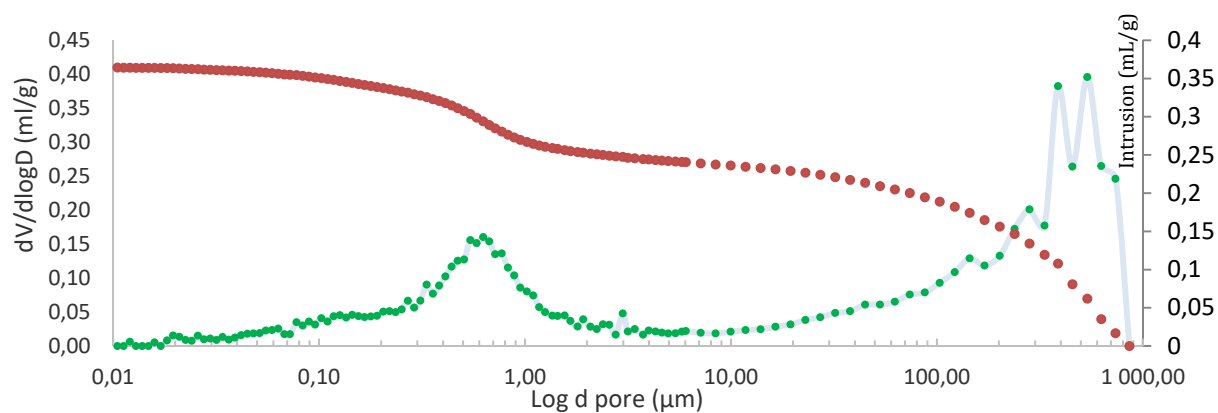
Echantillons : 5,5-5,6 m-SC3



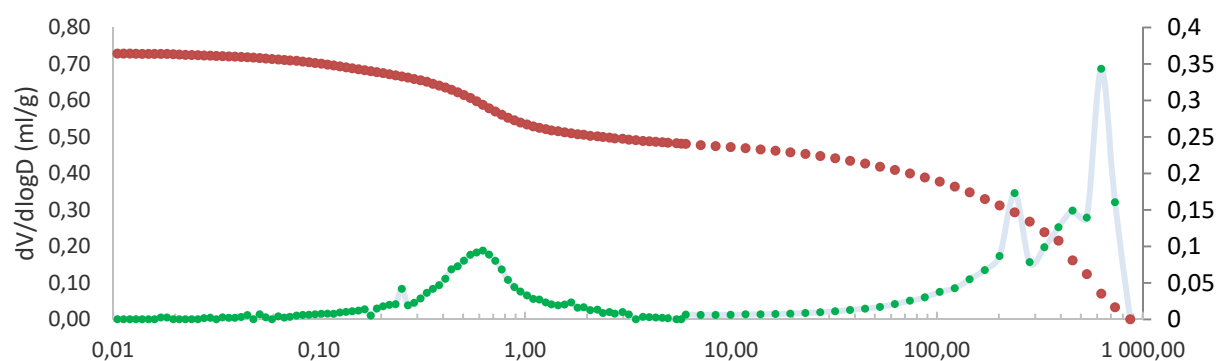
Echantillon : 6,32 m-6,4-SC3

Annexe 12- 2 : Courbes de distribution de taille de pores

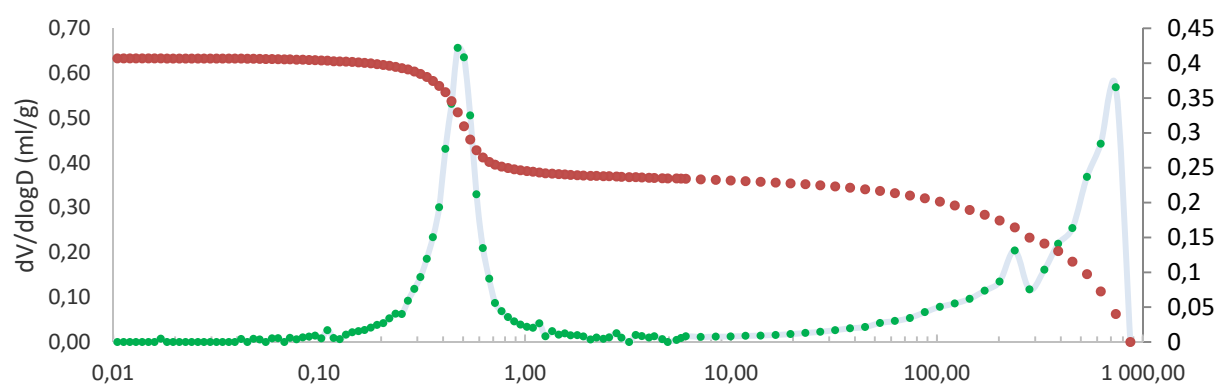
Courbes de distribution de taille de pores du SC1



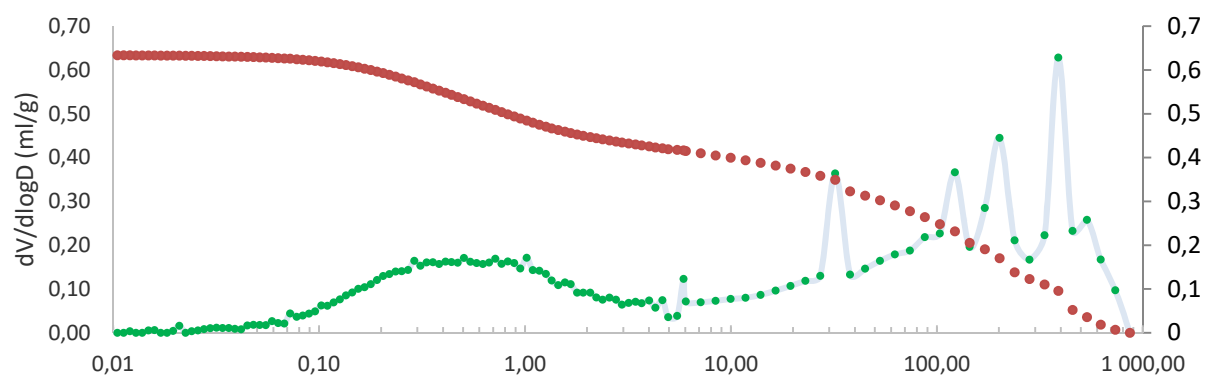
Echantillon : 1,2-1,3 m-SC1



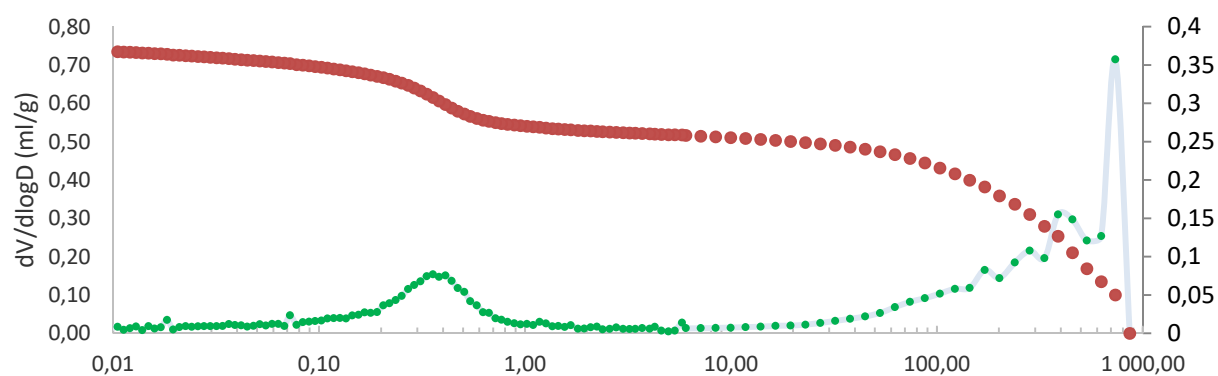
Echantillon : 1,5-1,6 m-SC1



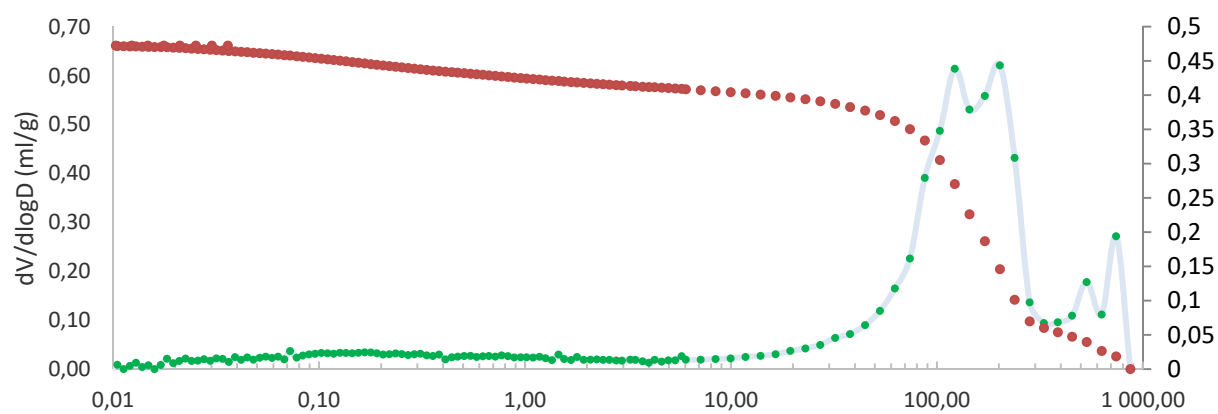
Echantillon : 3,3-3,4 m-SC1



Echantillon : 4,2-4,3 m-SC1

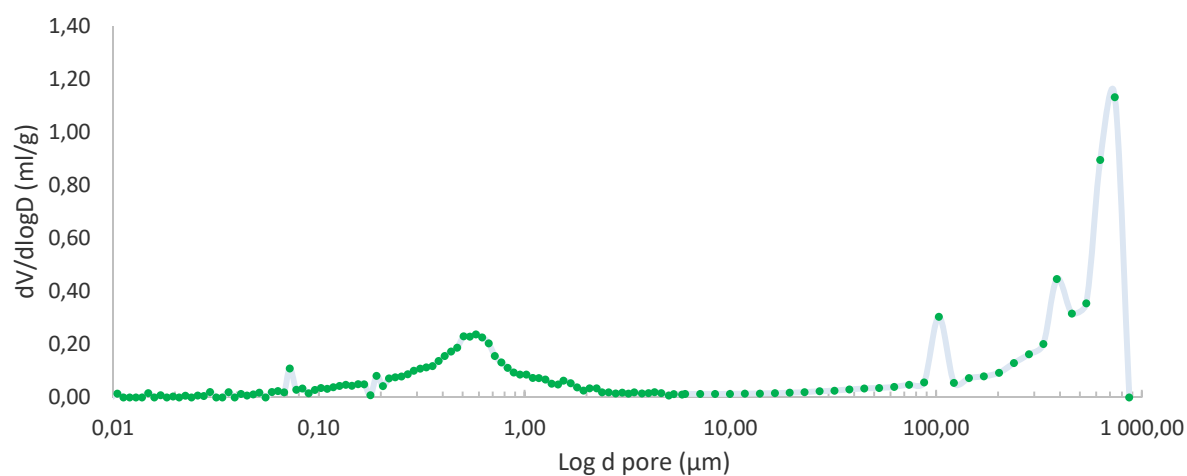


Echantillon : 5-5,1 m-SC1

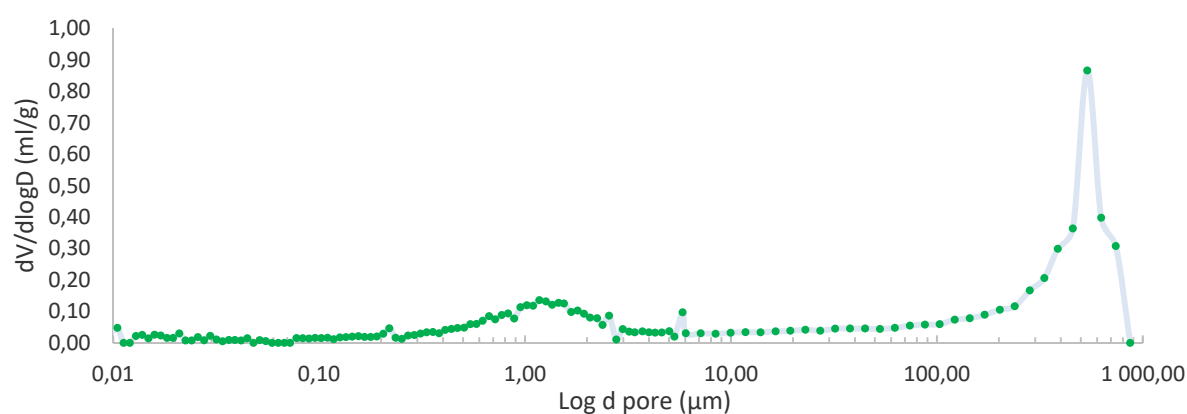


Echantillon : 5,9-5,97 m-SC1

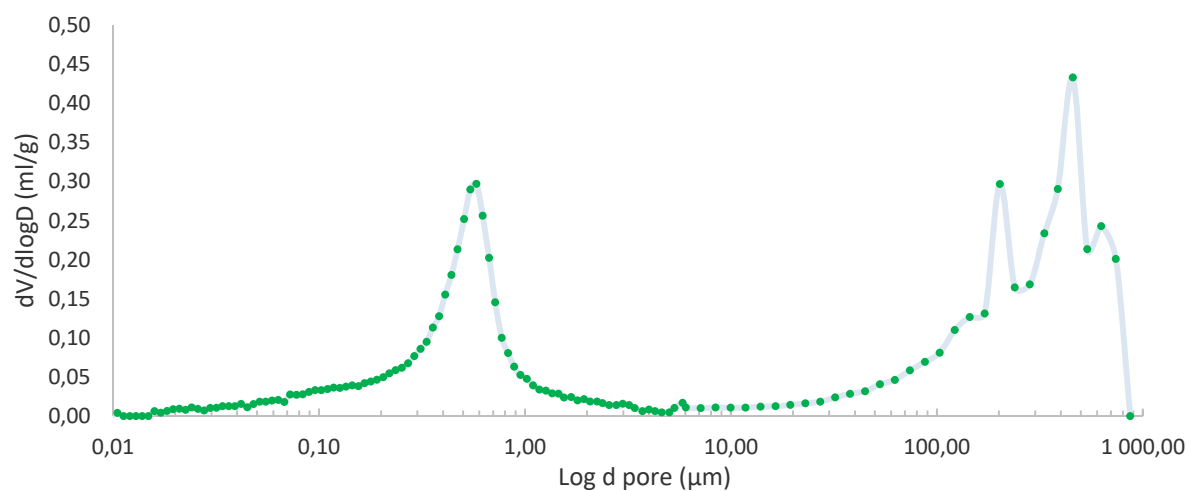
Courbes de distribution de taille de pores du SC2



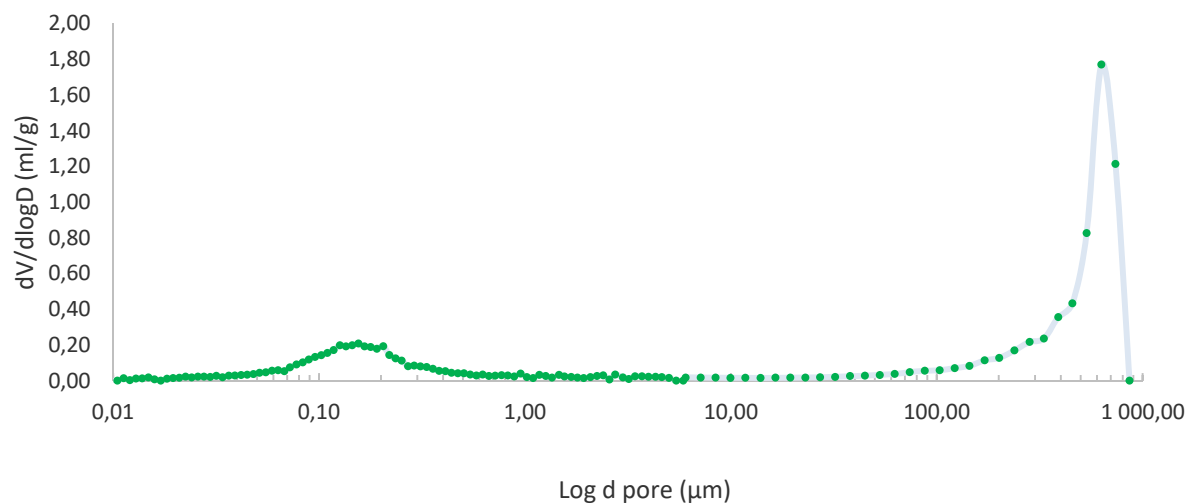
Echantillon : 1,2-1,3 m-SC2



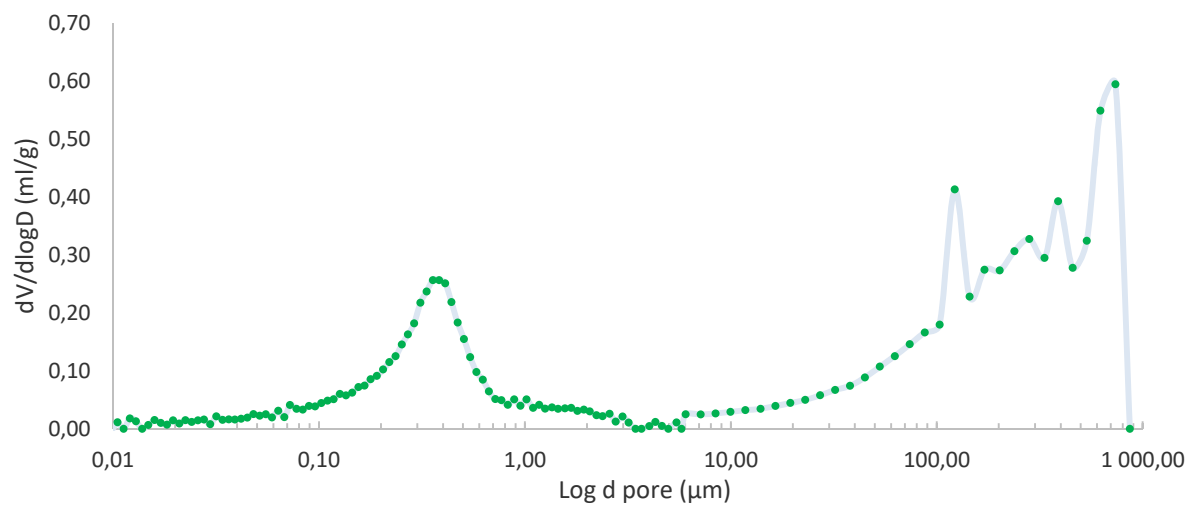
Echantillon : 1,5-1,6 m-SC2



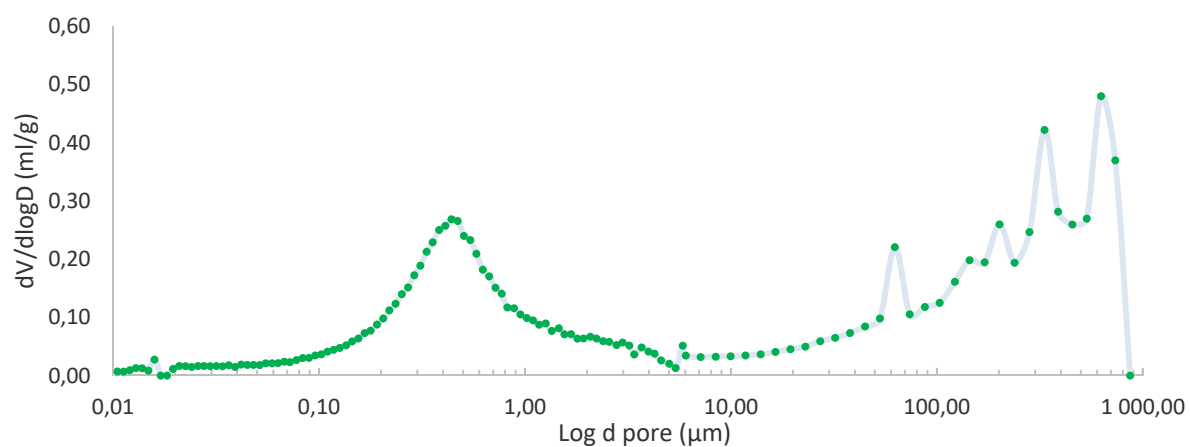
Echantillon : 1,9-2 m SC2



Echantillon : 4,3-4,4 m SC2

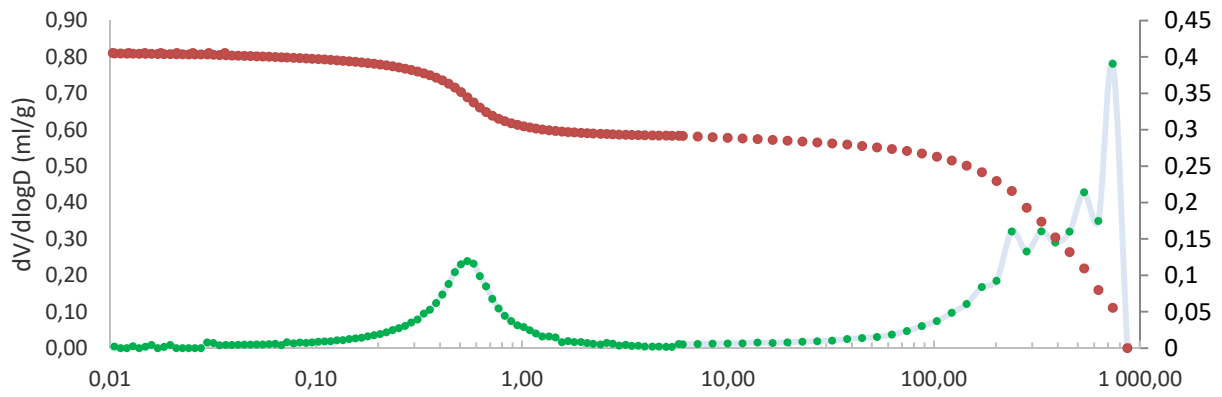


Echantillon : 4,8-5 m-SC2

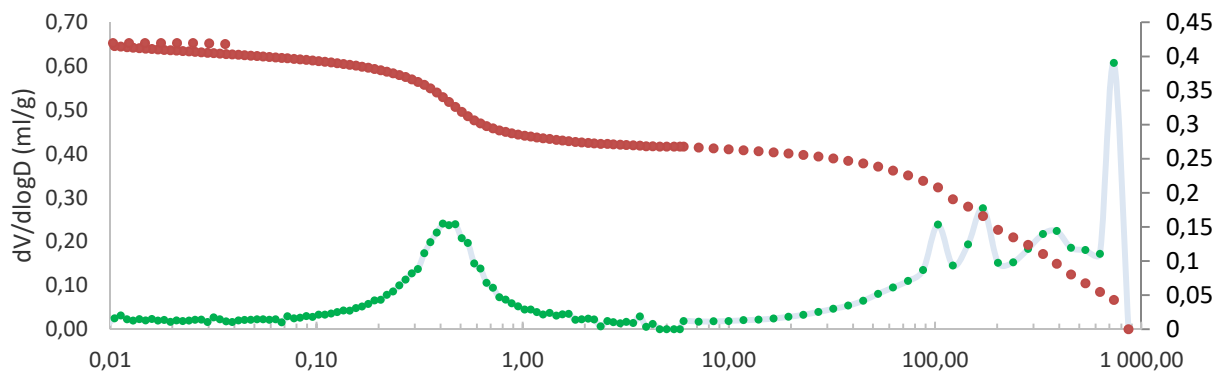


Echantillon : 5,3-5,4 m-SC2

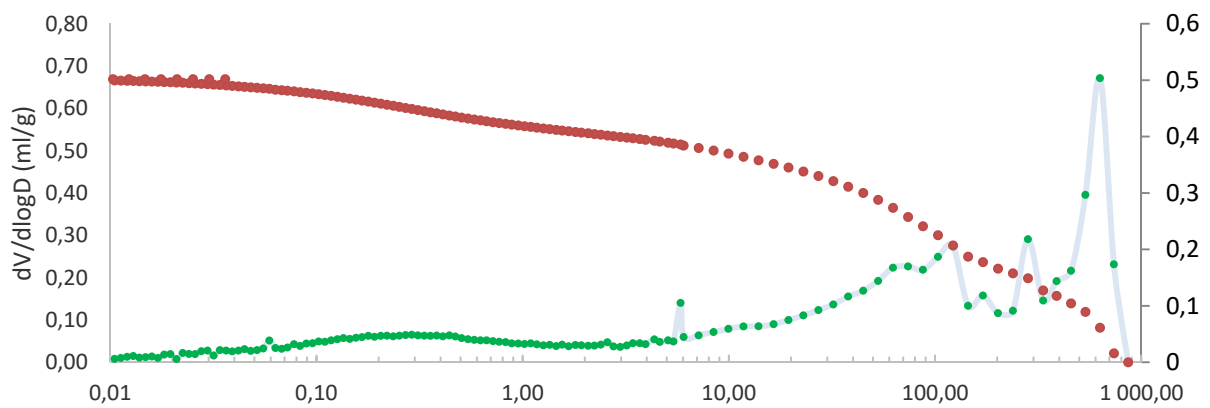
Courbes de distribution de taille de pores du SC3



Echantillon : 1,82-1,9 m-SC3



Echantillon : 2,7-2,76 m-SC3



Echantillon : 5,1-5,15 m-SC3

Annexes 14 : Données de variation de volumes des échantillons de la ZNS lors des essais multistep

Annexe 14- 1 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de marne de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai multistep, e_f est l'indice de vides à la fin de l'essai multistep, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initiale, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai multistep.

Faciès	I.D	e_i	e_f	Δe (%)	θ_f (cm ³ /cm ³)	σ_c (KPa)
Marne	1,2-1,25 m-SC2	0,56	0,52	6,73	31	14
	1,25- 1,28 SC2	0,55	0,51	6,88	30	14
	5-5,1 m-SC1	0,65	0,62	4,87	25	79
	6,3-6,35 m-SC2	0,50	0,44	11,83	30	1
	6,3-6,35 m-SC2^	0,49	0,42	14,16	30	101

Annexe 14- 2 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de sable de la ZNS. e_i est l'indice de vide avant de lancer l'essai multistep, e_f est l'indice de vides à la fin de l'essai multistep, Δe est la variation de l'indice de vides par rapport à l'état initiale, θ_f est la teneur en eau à la fin de l'essai, σ_c est la consolidation appliquée à l'échantillon pendant l'essai multistep.

Faciès	I.D	e_i	e_f	Δe (%)	θ_f (cm ³ /cm ³)	σ_c (KPa)
Sable	3,6-3,9 m-SC2	0,68	0,67	0,81	0,28	57
	4-4,2 m-SC3	0,72	0,69	3,87	0,19	63

Annexe 14- 3 Synthèse de résultats de la variation de volumes des échantillons de roche de la ZNS.

Faciès	Numérotation	e_i	e_f	Δe (%)	θ_f (cm ³ /cm ³)	σ_c (KPa)
Roche	5,1-5,25 m-SC2	0,31	0,28	7,61	6	80
	6,8-6,9 m-SC2	0,16	0,14	14,47	12	111
	7,45-7,55 m-SC2	0,13	0,11	16,71	8	123
	13,2-13,3 m-SC2	0,16	0,11	33,54	11	240
	14,59-14,68 m-SC2	0,08	0,04	47,72	7	269
	16,1-16,2 m-SC2	0,17	0,15	10,85	7	300
	MOY :	0,17	0,14			

[ALDANA Carlos]

ETUDE DES PROPRIETES DE TRANSFERT DE LA ZONE NON SATUREE

Application aux Calcaires Aquitaniens de l'aquifère de Beauce.

L'aquifère calcaire de Beauce a été étudié au cours des dernières décennies. Cependant, la plupart des études ont concerné les tous premiers mètres de la zone non saturée (ZNS) (0 à 3 mètres) et/ou la zone saturée de l'aquifère. Les processus d'écoulement, à travers la ZNS, largement stratifiée, ne sont pas bien compris. De nombreux auteurs ont souligné son hétérogénéité, aussi bien latérale que verticale, avec des lithologies assez variables. L'accès à toute la ZNS reste un enjeu majeur, dont les principales difficultés sont techniques et économiques. L'objectif général de ce travail de recherche est de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de l'eau au sein de la ZNS des calcaires aquitaniens de l'aquifère de Beauce. Cette ZNS va de la surface du sol jusqu'à une profondeur d'une vingtaine de mètres. Au droit du site d'étude retenu (lieu-dit « les Hôtels »), la nappe s'établissait à 18,3 m en mars 2017. L'échantillonnage de la zone d'étude a été réalisé via une campagne de carottage au terrain. Trois sondages carottés d'une profondeur de 20 m ont permis de recueillir suffisamment d'échantillons intacts pour pouvoir réaliser un certain nombre de caractérisations physiques, physicochimiques, minéralogiques et hydriques. Pour l'étude des propriétés de transfert de ces échantillons, un dispositif expérimental de type triaxial a été conçu pour la mesure des propriétés hydriques avec la méthode multi-step de débit d'extraction. Les caractéristiques de rétention en eau ont été comparées à celles mesurées par la méthode de la presse de Richards, et complétées par des mesures dans la gamme de pF 3-6, réalisées à l'aide du dispositif WP4C. La conductivité hydraulique à saturation des faciès sableux et sablo-marneux sont les plus élevées parmi les faciès de la ZNS à exception des certains échantillons de roches micro-fissurées. Les valeurs plus faibles ont été observées pour le sol limono-argileux et pour les faciès de marne. La rétention en eau la plus élevée est celle mesurée pour les sols. Les valeurs les plus faibles correspondent à la roche. Les faciès de roche calcaire se désaturent très rapidement lorsque le potentiel matriciel diminue, ce qui engendre une diminution brutale de la conductivité hydraulique. Nos résultats montrent que les premiers mètres de la ZNS représentent une zone où l'écoulement (vertical) vers la nappe est relativement lent, mais, à partir d'environ 7 mètres de profondeur, le transport de l'eau est beaucoup plus rapide étant donné la présence de fissures et fractures et la faible rétention en eau des couches de roches plus profondes de la ZNS. Une première estimation du temps de transfert dans la ZNS de l'aquifère des Calcaires de Beauce, au droit du site étudié, donne une valeur de 25 – 30 ans.

Mots clés: Zone non saturée, propriétés hydriques, marne, roche calcaire, sol argilo-limoneux, système triaxial non conventionnel.

PROPERTY-TRANSFERT STUDY TO ESTIMATE HYDRAULIC PROPERTIES OF VADOSE ZONE

An insights from the Aquitanien Beauce Limestone aquifer.

The Beauce limestone aquifer has been studied in recent decades. However, most of the studies concerned the very first meters of the unsaturated zone (VZ) (0 to 3 meters) and / or the saturated zone of the aquifer. The flow processes, through the widely stratified VZ are not well understood. Many authors have emphasized its heterogeneity, both lateral and vertical, with quite variable lithologies. Access to the entire VZ remains a major issue, whose main difficulties are technical and economic. The goal is to contribute to a better understanding of the mechanisms of water transfer within the VZ of the lime Beauce aquifer. This VZ goes from the surface of the ground to a depth of about twenty meters. In the area of interest (lieu-dit "les Hôtels"), the water table was found at 18.3 m depth in march 2017. Sampling of the unsaturated zone was carried out via a coring campaign. Three wells were cored from surface up to a depth of around 20 m. Sampling of the VZ allowed to perform physical, physicochemical, mineralogical and hydraulic characterizations of the unsaturated material. To study the transfer properties of these samples, a triaxial system was set up to measure hydraulic properties using the multistep outflow method. The water retention curves were compared to those measured by the temp cell method (Richards method), and supported by measurements in the pF 3-6 range, performed using the WP4C device. The saturated hydraulic conductivity values of sandy and sandy-marly samples were the largest among all unconsolidated materials of the vadose zone of the aquifer. Rock samples having micro-fissures and fractures showed the largest values of saturated hydraulic conductivity. Lower values were observed for loamy clay soil and for marl samples. The highest water retention is that measured for soils. The lowest values correspond to the rock. Rocks samples drain very rapidly when the matrix potential decreases, which causes a sudden decrease in the hydraulic conductivity. Our results show that the first meters of VZ represent an area where the (vertical) flow towards the aquifer is relatively slow, but, from about 7 meters deep, water transport is much faster due to the presence of cracks and also due to the low water retention of the deeper rock layers of the VZ. An initial estimate of the transfer time through the VZ of the Beauce limestone aquifer, at the field site, gives a value of 25 to 30 years.

Key words: Vadose zone, hydraulic properties, marl, limestone, silty clay soil, unconventional triaxial system.



ISTO 1A rue de Férollerie, 45100 Orléans

