



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

ÉVALUATION AU LABORATOIRE DE LA CAPACITÉ DES
RECOUVREMENTS À BASE D'ARGILE DE L'ABITIBI À LIMITER LE FLUX
D'EAU D'ATTEINDRE LES RÉSIDUS RÉACTIFS SOUS-JACENTS.

Mémoire
présenté
comme exigence partielle
du Génie mécanique

Par
EMMANUEL NIAMKE

NOVEMBRE 2024

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant.

Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de recherche professeur Maqsoud Abdelkabar, pour sa patience, sa disponibilité et son implication cruciale, quant à mon orientation durant cette recherche, je le remercie pour ses précieux conseils et ces remarques pertinentes, qui m'ont permis d'effectuer le travail qui m'a été confié. Je remercie mes co-directeurs Professeur Tikou Belem et Professeur Mamert Mbonimpa, pour leurs conseils, leurs assistances et leurs remarques, qui m'ont permis de délivrer ce travail.

Je remercie les membres du jury pour leur présence, leurs disponibilités et leurs futures remarques que je prendrai en compte, afin de finaliser mon travail. Je remercie la Fonderie Horne (Glencore) et le Fond de Recherche du Québec, Nature et Technologie (FRQNT), qui ont financé cette recherche, afin qu'elle soit mise à la disposition de la communauté scientifique.

Je remercie la Directrice de l'URSTM Awoh Akué-Sylvette pour son aide et assistance, et l'équipe de l'URSTM, notamment : Perreault Alain, Côté Lilas, Noirant Guillaume, Pierre-Alain Jacques, Joël Beauregard, Solano Oliverio, Turcotte Jean-Christophe, Germain Roch, Julie Beaulieu, Basto Elvin et Josée Grenier pour leur disponibilité et assistance dans mes travaux de laboratoire. Ainsi que l'équipe de l'UQAT et l'IRME. Je remercie mes collègues, Alejandro Granados et Merzouk Abdesselam, pour leurs aides, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Je remercie mon père feu Jean Niamké, ma mère Marianne Niamké, mon frère Joseph Niamké, ma sœur Karen Niamké, et ma conjointe Linka Okon pour leurs soutiens et encouragements, et madame Sylvie Guiguemde pour son assistance. Je remercie ma tante Cecilia Beya Acquah et mon oncle John Kofi Acquah pour leurs prières et soutiens, ainsi que Papa et Maman Okon pour tous leurs encouragements.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à Dieu tout puissant, qui m'a donné la force, le courage et la résilience nécessaire, pour effectuer ce travail avec passion et détermination. Je dédie ce mémoire à mes parents, pour tous leurs soutiens aux quotidiens, pour toutes leurs prières, leurs efforts, et les sacrifices effectués pour mon éducation. Je dédie ce mémoire à mon père, ma mère, ma sœur, mon frère et à ma conjointe pour leurs soutiens et encouragements, ainsi qu'à ma famille et mes amis.

Emmanuel Niamké, Dieu est avec nous.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
DÉDICACE	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	XII
RÉSUMÉ.....	XIV
1. CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte générale de l'étude	1
1.2 Objectifs.....	2
1.3 Hypothèses de recherche.....	2
1.4 Originalité du projet.....	3
1.5 Structure du mémoire	3
2. CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Problématique du drainage minier acide	4
2.2 Impact du drainage minier acide sur l'environnement.....	6
2.3 Solutions au problème du drainage minier acide	8
2.4 Méthodes de gestion des rejets et de restauration des sites miniers	8
2.4.1 Désulfuration environnementale comme méthode de gestion des rejets de concentrateurs.....	8
2.4.2 Barrières à l'oxygène.....	10
2.4.2.1 Couverture à effet de barrière capillaire	12
2.4.2.2 Recouvrements aqueux.....	15
2.4.2.3 Recouvrement monocouche combiné avec une nappe phréatique surélevée .	16
2.4.3 Barrière hydraulique.....	17
2.4.3.1 Recouvrements utilisant les géomembranes.....	18
2.4.3.2 Recouvrements utilisant les géocomposites bentonitique.....	18
2.4.3.3 Recouvrements utilisant des couches de sols fins	19
2.5 Les différents types de dépôts d'argiles, leurs classifications, structures et leurs propriétés respectives	20

2.5.1	Les types de dépôt d'argile au Québec	20
2.5.2	Classifications des argiles	22
2.5.3	Structures des argiles	22
2.5.4	Types d'argile et leurs propriétés respectives	23
2.6	Propriétés de base	26
2.6.1	Porosité (n)	26
2.6.2	Teneur en eau gravimétrique (w).....	27
2.6.3	Densité relative des grains (GS).....	27
2.6.4	Degré de saturation (Sr).....	27
2.6.5	Indice des vides (e).....	28
2.6.6	Teneur en eau volumique (θ)	29
2.6.7	Limites d'Atterberg	30
2.6.7.1.	Limite de liquidité.....	30
2.6.7.2.	Limite de plasticité.....	30
2.6.7.3.	Limite de retrait.....	31
2.6.7.4.	Indice de plasticité	31
2.6.7.5.	Indice de consistance.....	32
2.6.8	Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux.....	33
2.6.9	Forces de cohésion et de répulsions entre les minéraux argiles.....	34
2.7	Limitations dans l'utilisation des argiles	35
2.8	Courbe de rétention d'eau (CRE).....	36
2.8.1	Définition de la courbe de rétention d'eau	36
2.8.2	Mesure de la CRE et l'influence de l'indice de plasticité.....	38
2.8.2.1.	Extracteur à pression ou « pressure plate »	38
2.8.2.2.	Tempe cell	39
2.8.2.3.	Essai en colonnes.....	39
2.8.2.4.	Papier filtre	40
2.8.2.5.	Méthode d'équilibre de pression de vapeur.....	40
2.8.3	Effets de l'indice de plasticité des sols argileux sur la CRE	41
2.8.4	Méthodes descriptives de la courbe de rétention d'eau.....	42
2.8.4.1.	Modèle de lissage de Brooks et Corey (1964).....	43

2.8.4.2.	Modèle de lissage de van Genuchten (1980)	43
2.8.4.3.	Modèle de lissage de Fredlund et Xing 1994	43
2.8.5	Méthode de prédiction de la courbe de rétention d'eau	44
2.8.5.1.	Modèle de prédiction d'Aya et Paris	44
2.8.5.2.	Modèle de prédiction de Kovàc modifié (MK)	45
2.9	Conductivité hydraulique saturée de l'argile	49
2.9.1	Définition de la conductivité hydraulique saturée	49
2.9.2	Mesure de la conductivité hydraulique saturée	49
2.9.2.1.	Perméamètre à parois rigides	49
2.9.2.2.	Perméamètre à parois flexibles	49
2.9.3	Prédictions de la conductivité hydraulique	50
3.	CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	53
3.1	Caractérisation physique	54
3.1.1	Préparation des échantillons	54
3.1.2	Densité relative des grains	54
3.1.3	Limites d'Atterberg	55
3.1.4	Distribution granulométrique	58
3.2	Caractérisation hydro-géotechnique	60
3.2.1	Conductivité hydraulique saturée	60
3.2.2	Courbe de rétention en eau	64
3.3	Méthodes d'essais en colonne des recouvrements à base d'argile de l'Abitibi	67
3.3.1	Configurations	67
3.3.2	Mise en place	69
3.3.3	Expérimentation	71
3.4	Calibrage des sondes	71
4.	CHAPITRE 4 RÉSULTATS	78
4.1	Caractérisations physiques	78
4.1.1	Densité relative (G_s)	78
4.1.2	Granulométrie	80
4.1.3	Caractérisation géotechnique	83
4.1.3.1.	Limites d'Atterberg des matériaux à base d'argile	83

4.1.3.2. Activité des matériaux à base d'argile.....	85
4.1.4 Caractérisations hydrogéologiques	87
4.1.4.1. Conductivités hydrauliques saturées	87
4.1.4.2. Courbes de rétention d'eau.....	88
4.2 Comportement hydrogéologique des recouvrements conçues à base d'argile non amendée et amendée	94
4.3 Évaluation des vitesses de percolation.....	115
5. CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	118
BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES	120
ANNEXE A –.....	129

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Schéma de production et de transfert du drainage minier (Abid, 2012)	7
Figure 2 Drainage minier acide, dans la mine de Kettara – Maroc	7
Figure 3 Schéma de la gestion intégrée des résidus miniers	9
Figure 4 Courbes du coefficient de diffusion effectif d'oxygène (D_e) estimé en fonction du degré de saturation (S_r)	11
Figure 5 Configuration d'un recouvrement CEBC multicouche (Aubertin, 1995)	12
Figure 6 Couche tétraédrique et octaédrique des argiles	23
Figure 7 Structure des feuillets des différents types d'argiles	26
Figure 8 CRE typique d'un sol limoneux (adapté), illustrant la méthode des tangentes (Fredlund & Xing, 1994).....	37
Figure 9 Courbe de rétention d'eau pour différents types de sol	37
Figure 10 Colonnes expérimentales instrumentées pour les mesures des teneurs en eau volumiques et des succions.....	39
Figure 11 Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs	41
Figure 12 Effets de l'indice de plasticité sur la CRE de six sols britanniques	42
Figure 13 Méthodologie générale du projet de recherche	53
Figure 14 Courbes granulométriques des matériaux de base	60
Figure 15 Perméamètre à parois flexibles	61
Figure 16 Perméamètre à parois rigides.....	63
Figure 17 Extracteur de plaque de pression.....	65
Figure 18 Cellules Tempes	66
Figure 19 Colonnes expérimentales	68
Figure 20 Configurations des colonnes expérimentales	69
Figure 21 Courbe de calibrage du mélange 1 (Argile maigre)	73
Figure 22 Courbe de calibrage du mélange 2 (Argile-15%de sable fin)	73
Figure 23 Courbe de calibrage du mélange 3 (Argile-15%de sable limoneux).....	74
Figure 24 Courbe de calibrage du mélange 4 (Argile-5%de sable fin).....	74
Figure 25 Courbe de calibrage du mélange 5 (Argile-25%de sable fin)	75
Figure 26 Courbe de calibrage du mélange 6 (Argile-5%de sable limoneux).....	75
Figure 27 Courbe de calibrage du mélange 7 (Argile-25%de sable limoneux).....	76

Figure 28 Courbe de calibrage du Sable fin	76
Figure 29 Courbe de calibrage des Résidus	77
Figure 30 Courbes granulométriques des matériaux étudiés	80
Figure 31 Diagramme de plasticité et zones de classification des matériaux.....	84
Figure 32 Classification du potentiel de changement de volume (sols argileux).....	86
Figure 33 CRE du mélange 1	88
Figure 34 CRE du mélange 2.....	88
Figure 35 CRE du mélange 3.....	89
Figure 36 CRE du mélange 4.....	89
Figure 37 CRE du mélange 5.....	90
Figure 38 CRE du mélange 6.....	90
Figure 39 CRE du mélange 7.....	91
Figure 40 CRE du sable limoneux.....	91
Figure 41 CRE du sable fin	92
Figure 42 Mesures des suctions au niveau de la colonne témoin	95
Figure 43 Résultats des teneurs en eau de la colonne témoin.....	95
Figure 44 Suctions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement d'argile sans amendement.....	97
Figure 45 Teneurs en eau volumiques mesurées dans la colonne simulant le recouvrement d'argile sans amendement	97
Figure 46 Suctions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable fin.....	99
Figure 47 Résultats des teneurs en eau mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable fin	100
Figure 48 Suctions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable fin.....	101
Figure 49 Teneur en eau volumiques mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable fin.....	102
Figure 50 Suctions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin.....	104

Figure 51 Résultats des teneurs en eau au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin	105
Figure 52 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable limoneux	106
Figure 53 Résultats des teneurs en eau volumiques mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable limoneux.....	107
Figure 54 Succions mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable limoneux	108
Figure 55 Teneurs en eau volumiques au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable limoneux.....	109
Figure 56 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin.....	111
Figure 57 Teneurs en eau mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin	112
Figure 58 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec deux couches d'argile	113
Figure 59 Teneurs en eau volumiques mesurées au niveau de la colonne composée de deux couches d'argile non amendée	114
Figure 60 Niveau d'eau au-dessus du recouvrement à base d'argile	115
Figure 61 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 2.....	129
Figure 62 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 3.....	130
Figure 63 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 4.....	130
Figure 64 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 5.....	131
Figure 65 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 6.....	132
Figure 66 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 7.....	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Équations de prédiction de k_{sat} (Kalonji, 2014)	51
Tableau 2 Densité relative des grains solides des matériaux de base	55
Tableau 3 Limites d'Atterberg du matériau de base (Argile maigre)	57
Tableau 4 Pourcentages des matériaux de base dans les mélanges préparés en laboratoire ..	58
Tableau 5 Analyses et classifications granulométriques des matériaux de base.....	59
Tableau 6 k_{sat} mesurée des matériaux de base.....	64
Tableau 7 AEV des matériaux	67
Tableau 8 Paramètres de mise en place des colonnes expérimentales	70
Tableau 9 Équation de conversion des signaux et leurs coefficients de corrélation.....	72
Tableau 10 Densité relative des grains solides des matériaux à base d'argile composés de mélange d'argile maigre et de sable fin	79
Tableau 11 Densité relative des grains solides des matériaux à base d'argile composés de mélange d'argile et de sable limoneux	79
Tableau 12 Classification granulométrique des matériaux amendés avec du sable limoneux	82
Tableau 13 Classification granulométrique des matériaux amendés avec du sable fin.....	82
Tableau 14 Limites d'Atterberg des matériaux à base d'argile	83
Tableau 15 Activité et classification des matériaux à base d'argile	85
Tableau 16 k_{sat} mesurée des matériaux à base d'argile.....	87
Tableau 17 AEV des matériaux.....	93
Tableau 18 Volumes d'arrosage, volumes d'eau récupérée et volumes d'eau retenu au-dessus des recouvrements durant 325,5 jours d'essais en colonnes de laboratoire	116
Tableau 19 Hauteurs d'eau écoulée, vitesses d'écoulement obtenues durant 325,5 jours d'essais en colonnes de laboratoire et k_{sat} des matériaux d'intérêt issue des caractérisations.....	116

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AEV: Air Entry Value

Al: Aluminium

As: Arsenic

Ca: Calcium

Cc: Coefficient de courbure

CEBC: Couvertures avec Effet de Barrière Capillaire

CL: Argile maigre

Col : Colonne

Cu : Cuivre

C_u : Coefficient d'Uniformité

Cr : Chrome

CRE : Courbe de Rétention d'Eau

DMA : Drainage Minier Acide

D10 : 10% du pourcentage passant des grains solides

D30 : 30% du pourcentage passant des grains solides

D60 : 60% du pourcentage passant des grains solides

D90 : 90% du pourcentage passant des grains solides

E_h : Potentiel d'oxydoréduction

GCB : Géo Composite Benthonique

Li: Lithium

LSHCC: Low Saturated Hydraulic Conductivity Cover

MERN: ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

Mél: Mélange

Mg: Magnésium

Pb : Plomb

PEHD : Poly Éthylène à Haute Densité

Ni: Nickel

O: Oxygène

OH: molécules d'hydroxyde

pH: potentiel Hydrogène

SDR: Store Divert Release

SF : Sable Fin

SM: Sable silteux

SP : Sable mal gradué avec limon

Si : Silicium

Ti : Titane

UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

URSTM : Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale

RÉSUMÉ

Lorsque les rejets miniers sont considérés comme potentiellement générateurs d'acidité, diverses options de gestion peuvent être utilisées pour inhiber la production du drainage minier acide (DMA). Parmi ces techniques, on peut trouver : les barrières à l'oxygène et les couvertures à faible conductivité hydraulique saturée (CFCHS). Le but des couvertures à faible conductivité hydraulique saturée, est de limiter l'infiltration d'eau vers les résidus réactifs, empêchant ainsi, les réactions d'oxydation des minéraux sulfurés. Puisqu'une barrière hydraulique vise à limiter l'infiltration d'eau, la couche CFCHS doit avoir une conductivité hydraulique saturée (k_{sat}), inférieure à 10^{-9} m. s⁻¹. Différents matériaux peuvent être utilisés dans les CFCHS, tels que les géomembranes, les géosynthétiques et les argiles compactées ou non. Les matériaux argileux de la région de l'Abitibi couvrent de très grandes superficies, mais sont peu valorisés dans la restauration des sites miniers, en raison de leur susceptibilité aux effets de gel-dégel. Ces effets induisent des changements significatifs dans les propriétés hydrogéologiques des matériaux argileux, permettant une augmentation de leur k_{sat} . Récemment, les matériaux argileux de l'Abitibi ont été amendés avec du sable et du silt en laboratoire et soumis à différents cycles de gel-dégel et les résultats d'investigation, ont montré que ces effets sur k_{sat} ont été minimisés. C'est donc pour évaluer la possibilité d'utiliser ces matériaux argileux de l'Abitibi dans la restauration du site minier « Quémont 2 », que cette étude a été lancée. Pour cela, les matériaux argileux ont été amendés (avec différentes proportions de sable fin et de sable limoneux) et ces derniers ont été caractérisés (caractérisations physiques, géotechniques et hydrogéologiques). Ces matériaux ont été placés dans des colonnes expérimentales instrumentées de laboratoire (au total neuf). Ensuite ces colonnes ont été soumises à des cycles de mouillage-drainage où la teneur en eau volumique, et les succions matricielles ont été mesurées.

Mots-clés : Argiles, couvertures, infiltration, eau, barrières.

1. CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Contexte générale de l'étude

L'activité minière constitue l'ensemble des processus à travers lesquels des minéraux précieux sont extraits de manières sécuritaires du sol, de sorte à faire du profit.

On distingue généralement deux types de mines selon la localisation du gisement : les mines à ciel ouvert pour les gisements peu profonds et les mines souterraines pour les gisements profonds.

Les activités minières comprennent trois phases à savoir l'exploration, l'extraction et la restauration. La phase d'exploration consiste en la recherche et à l'évaluation du gisement, la phase d'extraction, en la mise en production du gisement et la phase de restauration quant à elle se caractérise, à la fois, par la remise en état de tous les sites impactés par l'activité minière et par la gestion des rejets miniers suivant les normes environnementales régies par les lois en vigueur au Canada et au Québec.

Selon le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN), plusieurs sites miniers abandonnés ont déjà été restaurés, tandis que d'autres sont également en processus de caractérisation et de restauration. Il est question ici de souligner l'importance de la restauration minière, puisque les sites miniers constituent des dépôts importants de résidus réactifs sulfureux, qui lorsqu'ils sont exposés à l'air et à l'eau, produisent le drainage minier acide.

Le drainage minier acide a déjà fait l'objet de recherche et continue de l'être à ce jour. Ces recherches visent à prévenir, voire annuler les effets de ce problème environnemental, par la mise en place de recouvrements, qui agiront comme barrières face à l'oxygène et/ou comme barrière hydraulique, en utilisant des matériaux grossiers tels que des sables, et des matériaux fins tel que les limons et les argiles.

Les barrières hydrauliques ou les couvertures à faible conductivité hydraulique saturée (CFCHS), ont pour but de limiter l'infiltration d'eau vers les résidus réactifs, empêchant ainsi, les réactions d'oxydation des minéraux sulfurés. Le contrôle de l'infiltration d'eau

est assuré par l'une des couches du recouvrement qui doit avoir une conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) inférieure à 10^{-9} m. s⁻¹. Différents matériaux peuvent être utilisés dans les CFCHS, tels que les géomembranes, les géosynthétiques et les argiles compactées ou non.

Les matériaux argileux de la région de l'Abitibi, couvrent de très grandes superficies, mais sont peu utilisés dans la restauration des sites miniers, en raison de leurs susceptibilités aux effets de gel-dégel. Ces effets induisent des changements significatifs dans les propriétés hydrogéologiques de ces matériaux, engendrant ainsi une augmentation de leur k_{sat} , les rendant ainsi inefficaces, quant au contrôle des infiltrations. Récemment, les matériaux argileux de l'Abitibi ont été amendés avec du sable et du silt en laboratoire, et soumis à différents cycles de gel-dégel. Les résultats de ces investigations ont montré que ces effets de gel-dégel sur k_{sat} ont été minimisés.

L'efficacité des matériaux amendés doit être démontré, à travers des simulations physiques des recouvrements, qui seront effectués à l'aide de colonnes expérimentales au laboratoire, et c'est ce qui fait l'objet de ce travail de recherche.

1.2 Objectifs

L'objectif de ce projet de recherche est donc d'évaluer au laboratoire la capacité des recouvrements à base d'argiles à réduire les infiltrations d'eau vers les rejets réactifs sous-jacents. La méthodologie à suivre, pour atteindre cet objectif général, se subdivise en deux étapes principales :

- Préparation des mélanges à base d'argile et caractérisation de leur propriétés hydrogéologiques et géotechniques;
- Simulations physiques au laboratoire des recouvrements de type CFCHS et l'évaluation de leur capacité à limiter le flux d'eau vers les résidus réactifs sous-jacents.

1.3 Hypothèses de recherche

Ce projet sera réalisé en tenant compte des hypothèses suivantes :

- Les mélanges à base d'argile ont les propriétés hydrogéologiques et géotechniques adéquates pour être utilisé comme barrières hydrauliques
- Les recouvrements de type CFCHS simulés à l'aide de colonnes expérimentales de laboratoire réduisent efficacement les infiltrations d'eau vers les résidus réactifs sous-jacents;

1.4 Originalité du projet

L'originalité de ce projet réside dans le fait qu'on vise à valoriser les matériaux argileux abitibiens qui jusqu'à cette date sont peu voir inutilisés dans la restauration des sites miniers en raison de leur susceptibilité aux effets de gel-dégel. Ces matériaux argileux couvrent de très grandes étendues et constituent également la majeure partie du mort terrain excavé pour atteindre les gisements. La valorisation de ces matériaux et leur réutilisation dans la restauration des sites miniers va avoir impact économique très important ainsi qu'un impact environnemental.

1.5 Structure du mémoire

Le mémoire sera composé de cinq chapitres. Le chapitre 1, correspond à l'introduction qui permet de situer le sujet de recherche dans son contexte environnementale et présente les objectifs du travail ainsi que les hypothèses de travail et l'originalité du travail.

Le chapitre 2, qui est une revue de littérature, aborde les aspects relatifs à la génération du drainage minier acide, la restauration des sites miniers et l'écoulement de l'eau.

Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée, pour atteindre les objectifs du projet, notamment les méthodes de caractérisation physique, géotechnique et hydrogéologique utilisées pour réaliser les essais en laboratoire.

Le chapitre 4 présente les résultats des travaux réalisés.

Enfin, le chapitre 5 est consacré à la conclusion générale et aux recommandations quant à l'utilisation des matériaux argileux dans la restauration des sites miniers.

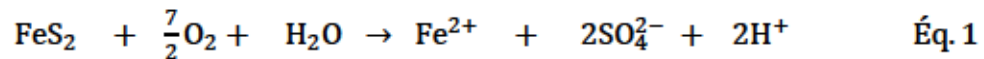
2. CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Problématique du drainage minier acide

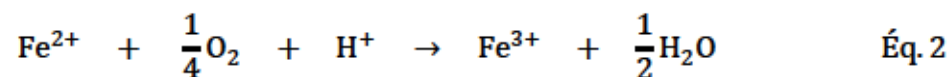
Le drainage minier acide, est un processus chimique, qui consiste en l'oxydation des rejets miniers sulfureux, lors de leurs expositions dans des parcs à résidus et dans les haldes à stérile (Aubertin et al., 2002).

En effet, les rejets miniers, lorsqu'ils contiennent des minéraux sulfureux et lorsqu'ils sont entreposés en surface, peuvent réagir avec l'air et l'eau, pour former des solutions contenant de l'acide sulfurique et du fer ferrique, suivant des réactions en chaîne d'oxydation de sulfate de fer, de fer ferreux, d'ion sulfaté ferrique et d'hydrolyse du fer ferreux (Kalin et al., 2006; Pelletier-Allard, 2014). Ces réactions se produisent, au fur et à mesure que la teneur en oxygène et le potentiel hydrogène varient.

Les réactions en chaîne subie par la pyrite par exemple, nous montrent les interactions entre l'air, l'eau et ce minéral qui aboutissent à la production du drainage minier acide, selon les équations chimiques suivantes :

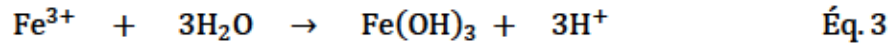


Dans l'équation (1), la pyrite contenant du fer et du soufre, réagit avec l'eau et l'oxygène contenus dans l'air pour produire des ions de fer ferreux, des sulfates et des ions hydrogènes. Le milieu devient, de plus en plus acide à cause des ions produits, débutant ainsi, le phénomène du drainage minier acide commence à se produire (Akcil & Koldas, 2006; Kalin et al., 2006; Pelletier-Allard, 2014; Plante et al., 2021).

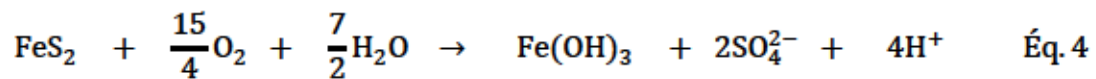


Dans l'équation (2), on peut observer qu'en présence d'oxygène et d'ions hydrogènes (H^+), les ions de fer ferreux s'oxydent en fer ferrique (Moncur et al., 2009). Cela se produit, lorsque le pH de la solution diminue, jusqu'à ce qu'il soit inférieur à 4. En effet, dans des conditions où la solution n'est pas neutralisée, les ions produits lors de l'équation (1)

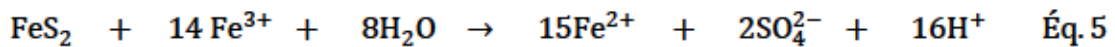
contribuent à l'acidité du milieu en diminuant progressivement le pH de l'eau (Akciil & Koldas, 2006; Pelletier-Allard, 2014; Plante et al., 2021).



Dans l'équation (3), les ions ferreux subissent une hydrolyse qui se caractérise par la formation d'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et d'ions hydrogène, au pH compris entre 2,3 et 3,5. Ces ions en question acidifient davantage le milieu qui est déjà acide, en libérant trois moles d'ions H^+ (Akciil & Koldas, 2006; Kalin et al., 2006; Moncur et al., 2009; Pelletier-Allard, 2014; Plante et al., 2021).



Dans l'équation (4), la pyrite réagit avec l'oxygène et l'eau, pour former des hydroxydes ferriques, des sulfates et des ions d'hydrogène acidifiant encore le milieu. L'équation générale ici qui est la fusion des équations (1) et (3), représente l'oxydation de la pyrite (Akciil & Koldas, 2006; Pelletier-Allard, 2014; Plante et al., 2021).



Dans l'équation (5), la pyrite s'oxyde en présence de fer ferrique (Fe^{3+}) et de l'eau, à des pH compris entre 3,5 et 4,5, pour produire des ions du fer ferreux (Fe^{2+}) et des ions hydrogènes H^+ qui rendent le milieu un peu plus acide (Bussière & Guittouy, 2020; Melanson, 2006; Pelletier-Allard, 2014). Les ions de fer ferreux (Fe^{2+}) s'oxyderont à leurs tours, selon l'apport en oxygène du milieu en fer ferrique (Fe^{3+}), comme observé dans l'équation (2), dans un cycle continu qui acidifie de plus en plus le milieu. Ce qui favorise donc la production de drainage minier acide (Melanson, 2006; Pelletier-Allard, 2014; Plante et al., 2021).

Il en ressort de ces équations que la pyrite, réagit avec l'eau et l'oxygène contenus dans l'air, afin de former des solutions devenant de plus en plus acides à différentes étapes des réactions en chaîne. Cela s'explique par le simple fait que, les ions hydrogènes produits

(H⁺) deviennent nombreux en solution au fur et à mesure que les réactions d'oxydation se produisent.

2.2 Impact du drainage minier acide sur l'environnement

Plus les parcs à résidus seront perméables, plus leurs matériaux seront susceptibles de se laisser traverser par l'oxygène et l'eau pour devenir réactifs (Akcil & Koldas, 2006; Pelletier-Allard, 2014). Ainsi, certains de ces matériaux, lorsqu'ils renferment des minéraux sulfureux, peuvent produire des solutions ayant de faibles pH, qui impacteront négativement la faune et la flore, et donc l'environnement, en acidifiant les eaux.

En effet, la mise en solution de métaux lourds et la baisse du pH contribuent à la destruction de la faune et la flore aquatique (Dupont, 2004). Cela s'explique par le fait que l'acidité du milieu favorise l'apparition de mousses aquatiques et d'algues gélatineuses recouvrant, ainsi la surface des plans d'eau. La photosynthèse est donc réduite, ce qui entraîne la disparition des espèces végétales. La majorité des espèces sensibles à l'acidité des eaux ne parviennent pas à survivre et leurs pertes entraîne par conséquent un déséquilibre au niveau de la chaîne alimentaire (Dupont, 2004).

L'impact dévastateur du drainage minier acide sur l'environnement est donc la résultante de l'acidification des eaux de surface, par le drainage des solutions issues des points de stockage des rejets miniers (voir Figure 1), qui conduisent aussi, à la détérioration de la qualité des eaux souterraines par des phénomènes de percolation (Demers, 2008; Down & Stocks, 1977; Gray, 1997; Paine, 1987). Ce phénomène est un problème majeur, en raison de son impact négatif sur l'environnement.

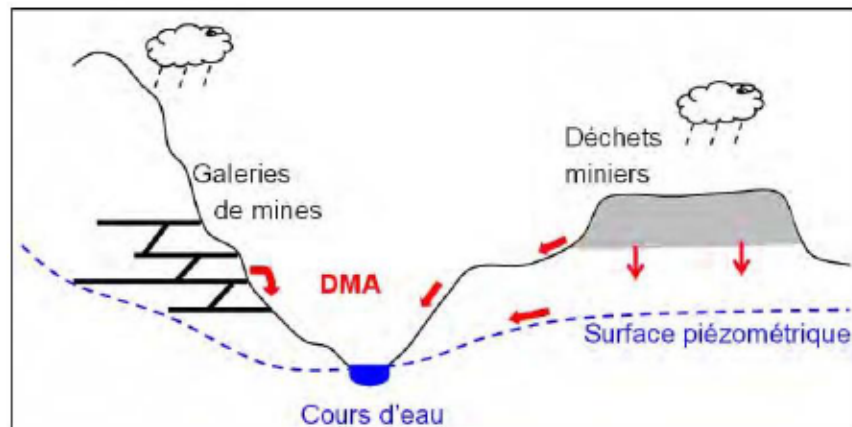


Figure 1 Schéma de production et de transfert du drainage minier (Abid, 2012)

Sur la Figure 1, on peut observer un schéma représentatif du processus de transport et d'infiltration du drainage minier acide vers les cours d'eau et les eaux souterraines.

Sur la Figure 2, on peut voir une photo prise sur le site minier Kettara (au Maroc), qui illustre la coloration de rouille sur les contours d'une eau stagnante. On remarque effectivement une coloration plus foncée au centre et jaunâtre sur les bords, nous indiquant ainsi la présence du phénomène du drainage minier acide (Ait Khouia, 2018; Plante et al., 2012).



Figure 2 Drainage minier acide, dans la mine de Kettara – Maroc d'après (Nfissi et al., 2018)

Au regard de la production exponentielle des mines aurifères contenant des sulfures, et donc de l'accumulation en parallèle de ces rejets miniers, il est primordial de trouver des solutions adéquates pour remédier au problème du drainage minier acide.

2.3 Solutions au problème du drainage minier acide

L'eau provenant généralement des précipitations, l'oxygène contenu dans l'air atmosphérique et les sulfures présents dans les rejets miniers, sont des facteurs clés qui ensemble participent à la génération du drainage minier acide. Éliminer, l'un ou plusieurs de ces facteurs, va conduire à stopper les réactions d'oxydation responsables de la génération du drainage minier acide. L'ensemble des solutions proposées, visent à contrôler, limiter voire éliminer l'apport en oxygène, en eau et en sulfure, par l'élaboration de différentes méthodes de restaurations. Ces méthodes sont essentiellement des techniques qui vont agir comme barrière face à l'oxygène ou à l'eau. On parle aussi de techniques visant à réduire les sulfures dans l'environnement concerné (Aubertin et al., 2015; Awoh et al., 2013; Benzaazoua et al., 2004; Bussière & Guittonny, 2020; Rowe, 2012).

2.4 Méthodes de gestion des rejets et de restauration des sites miniers

Différentes techniques ont été élaborées et visent à empêcher la production du drainage minier. Parmi ces techniques on trouve : la séparation des sulfures, la neutralisation par l'utilisation d'agrégats alcalins, l'élimination de l'action des bactéries par l'utilisation de bactéricide et phosphate minérale, l'exclusion d'eau par l'utilisation de couvertures étanches (de géomembranes ou de sols peu perméables) et enfin l'exclusion de l'oxygène par l'utilisation de recouvrement aqueux et de recouvrement multicouche, pour contrôler le drainage minier acide (Aubertin et al., 2015).

2.4.1 Désulfuration environnementale comme méthode de gestion des rejets de concentrateurs

La désulfuration environnementale est une méthode de gestion des résidus miniers, permettant de séparer les sulfures des rejets susceptibles de produire le drainage minier acide. Ces séparations se font par l'application de processus minéralogiques, tels que les

procédés de flottation des minéraux sulfureux (Aubertin et al., 2015; Benzaazoua et al., 2000 a; Bussière et al., 2002; Derycke et al., 2013; Mermillod-Blondin, 2005). En effet, ces minéraux sulfureux mis en suspension par flottation seront généralement collectés par les Xanthates (collecteurs), pour les rejets sulfurés polymétalliques (voir Figure 3). Dans les cas des minéraux contenant des cyanures, des collecteurs à base de carbamates ou d'amines seront utilisés pour rendre le processus plus efficace (Aubertin et al., 2015; Benzaazoua et al., 2000 a; Kongolo et al., 2004). À l'issue de cette séparation, deux types de résidus seront produits : des résidus désulfurés, contenant une très faible teneur en sulfure et des concentrés de sulfure hautement générateur du drainage minier acide. Après leurs séparations des rejets miniers, ces minéraux sulfureux extraits des rejets seront entreposés de manière adéquate, de sorte à les différencier des déchets miniers déjà désulfurés (Aubertin et al., 2015). Même si cette méthode réduit les sulfures sans toutefois éliminer les résidus réactifs, des recherches ont prouvé que la présence de fraction d'argile et de particules de taille excessivement grossières ou fines influencent négativement le processus de flottation et donc la qualité de la désulfuration (Aubertin et al., 2015; Benzaazoua et al., 2000 b; Derycke et al., 2013). Ces recherches ont permis de conclure que la taille optimale pour la flottation de particules sulfureuse se situe généralement aux alentours de 50 micromètres (Aubertin et al., 2015; Benzaazoua et al., 2000 b; Derycke et al., 2013).

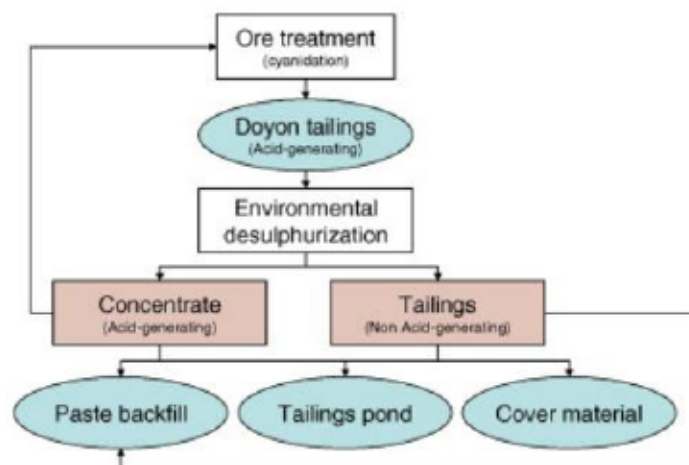


Figure 3 Schéma de la gestion intégrée des résidus miniers (Benzaazoua et al., 2008)

Sur la Figure 3, qui est un schéma de la gestion intégrée des résidus miniers du site Doyon (situé au Canada), nous observons qu'après la désulfuration environnementale des rejets miniers issus du traitement du minerai, on obtient des concentrés de sulfures, qui peuvent être valorisés. En effet, ces derniers peuvent être utilisés comme remblais en pâte cimentée, pour diminuer la quantité de résidus stockée sur les parcs, tandis que les résidus non générateurs d'acides quant à eux, peuvent être utilisés, comme matériaux dans la construction des recouvrements de type monocouche ou de type couverture avec effets de barrière capillaire, afin de prévenir la production du drainage minier acide. (Demers, 2008; Demers et al., 2009).

2.4.2 Barrières à l'oxygène

Concernant les techniques utilisées comme barrière à l'oxygène, la loi de Fick permet d'estimer le flux vertical d'oxygène (Aubertin et al., 2015; Bussière et al., 2007; Mbonimpa et al., 2003) à travers celle-ci, en utilisant l'expression de l'équation 6.

$$F_{O_2} = - D_e \frac{\partial CO_2}{\partial Z} \quad \text{Éq. 6}$$

Compte tenu du fait que l'oxygène se déplace à travers les recouvrements par diffusion moléculaire (Aubertin et al., 2015; Nicholson et al., 1989), le flux d'oxygène à l'intérieur des couvertures noté (F_{O_2}) qui oxydera les sulfures est donc fonction de la diffusion effective (D_e) et du gradient de concentration (δCO_2) selon l'axe vertical (Z) (Aubertin et al., 2015). Ce flux d'oxygène dépend donc de la diffusion effective, puisque (D_e), est un multiplicateur dans l'équation.

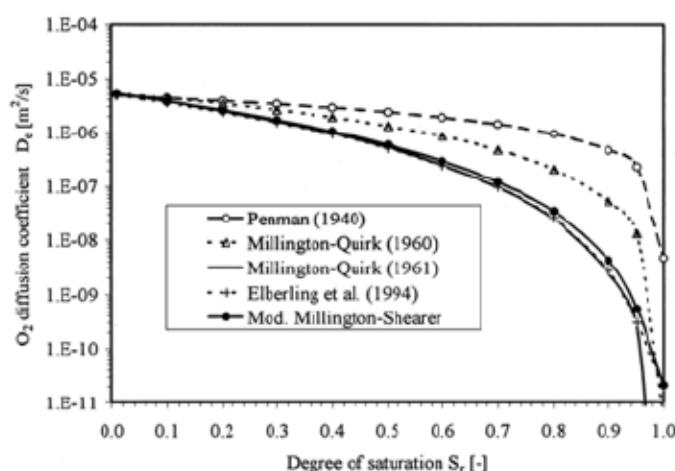


Figure 4 Courbes du coefficient de diffusion effectif d'oxygène (D_e) estimé en fonction du degré de saturation (S_r) (Aachib et al., 2004)

Selon la Figure 4 proposée par Aachib et al. (2004), la majorité des courbes estimées et applicable à leurs hypothèses suivant différents modèles, nous montrent que le coefficient de diffusion d'oxygène tend vers zéro, lorsque le degré de saturation tant vers 100%. De ce fait, la diffusion effective (D_e) est fonction du degré de saturation (S_r). D'après la littérature un degré de saturation de 85% est visé pour une barrière à l'oxygène plus efficace (Aachib et al., 2004; Aubertin et al., 2015; Bussière & Guittonny, 2020; Mbonimpa et al., 2003). Il en ressort donc, qu'évaluer l'efficacité d'un recouvrement comme barrière à l'oxygène, reviendrait à évaluer son degré de saturation.

Comme la concentration d'oxygène dans l'air est nettement supérieure à celle dissoute dans l'eau et que le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air est presque 10 000 fois supérieur à celui dans l'eau, il en ressort que la saturation d'une couche en eau dans un recouvrement permettra de réduire considérablement le flux de l'oxygène à travers le recouvrement, et vers les rejets réactifs (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 2015).

Différentes techniques de restauration utilisent les barrières à l'oxygène, parmi lesquelles on trouve : les couvertures avec effet de barrière capillaire (CEBC), les recouvrements aqueux et les recouvrements monocouches combinés avec une nappe phréatique surélevée.

2.4.2.1. Couverture à effet de barrière capillaire

Les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) sont constituées de plusieurs couches (de 3 à 5 couches) (Aubertin, 1995; Aubertin et al., 2015).

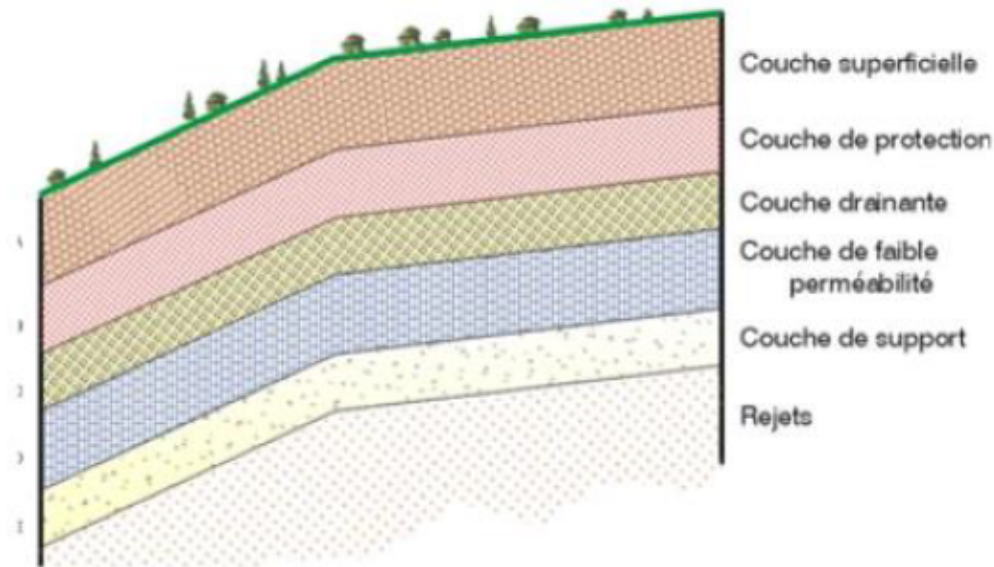


Figure 5 Configuration d'un revêtement CEBC multicouche (Aubertin, 1995)

La Figure 5 nous montre les cinq principales couches d'une CEBC, notamment la couche superficielle, la couche de protection, la couche drainante, la couche de faible perméabilité et enfin la couche de support.

Ainsi du haut en bas on trouve :

1) La couche superficielle en surface, c'est une couche de transition entre le revêtement et la nature, qui a pour objectif de réduire les fluctuations thermiques, de minimiser l'érosion et de créer les conditions adéquates pour la végétation. Elle est généralement constituée de matériaux de sols organiques, ayant une épaisseur comprise entre 15 et 20 cm (Aubertin, 1995; Bussière & Guittonny, 2020).

2) La couche de protection, comme son nom l'indique, elle protège les couches les plus basses contre l'érosion et les intrusions biologiques tout en réduisant les effets des cycles de gel-dégel sur les couches inférieures. Il est à noter que, certaines intrusions pourraient créer des chemins préférentiels et favoriser l'infiltration de l'eau et de l'oxygène. Cette

couche est composée de sable, de matériaux grossiers ou de roches concassées (Aubertin, 1995; Bussière & Guitttonny, 2020; Bussière et al., 2009).

3) La couche drainante composée de sable et de matériaux grossiers, disposés suivant une pente légère, sert à réduire l'accumulation de l'excès d'eau dans la structure par écoulement. Elle permet ainsi, à la couche suivante d'éviter de perdre de l'eau par évaporation en créant les effets de barrière capillaire à son interface avec la couche de rétention d'eau, tout en réduisant les pressions interstitielles. Son épaisseur est comprise entre 30 et 50 cm et sa conductivité hydraulique se situe entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s (Aubertin, 1995; Bussière & Guitttonny, 2020).

4) La couche de rétention d'eau ou de faible perméabilité empêche la diffusion de l'oxygène et l'infiltration de l'eau puisqu'elle réussit à garder un degré de saturation en eau élevé. Aussi, elle est composée de matériaux peu plastiques notamment de matériaux silteux ou argileux, ayant une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-7} m/s et une épaisseur comprise entre 50 et 100 cm.

5) La couche de support servant de base pour les couches supérieures. Elle empêche la couche rétention, de se désaturer en créant des effets de barrière capillaire au niveau de son interface qu'elle partage avec les matériaux fins, qui sont superposés au-dessus de sa structure. Elle draine l'eau et prévient la remontée par capillarité des eaux contaminées par les résidus sous-jacents. Elle est composée de matériaux grossiers ayant une épaisseur située entre 30 et 50 cm et une conductivité hydraulique saturée comprise entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s (Aubertin, 1995; Bussière & Guitttonny, 2020).

Cependant, si l'oxydation avait déjà commencée avant l'installation de la CEBC, il serait important de neutraliser les solutions aqueuses, évacuées au niveau de l'effluent final pour une meilleure qualité d'eau, sachant que les CEBC ont la capacité de réduire la vitesse de diffusion de l'oxygène atmosphérique vers les résidus, sans toutefois éliminer l'oxygène déjà présent dans les pores des résidus, qui même en faible quantité réussissent à oxyder les ions de fer ferreux (Fe^{2+}) en ions de fer ferriques (Fe^{3+}) et par la suite à oxyder directement les ions de fer ferriques (Fe^{3+}), tout en favorisant l'oxydation indirecte des sulfures. Notons également l'absence d'oxygène dans les équations précédemment présentées ((3) et (5)).

L'équation utilisée pour le calcul du flux diffusif d'oxygène à travers un recouvrement CEBC plus précisément à travers la couche de rétention en eau d'épaisseur L (Bussière et al., 2009; Mbonimpa et al., 2003) est définie par l'équation suivante :

$$F_{s,L} = \frac{C_0 D_e}{L} \quad \text{Éq. 7}$$

Où :

$F_{s,L}$: est le flux diffusif de l'oxygène à l'intérieur du recouvrement de type CEBC

C_0 : est la concentration d'oxygène dans l'air (mole/m³)

L : est l'épaisseur de la couche de rétention en eau

D_e : est le coefficient de diffusion du matériau constituant la couche de rétention d'eau (m²/s)

Le coefficient de diffusion effectif du matériau constituant la couche de rétention d'eau dans le recouvrement de type CEBC, est défini selon l'équation 8 (Aachib et al., 2002; Aachib et al., 2004; Bussière et al., 2009):

$$D_e = \frac{1}{n^2} (D_a^0 \Theta_a^{P_a} + H D_w^0 \Theta_w^{P_w}) \quad \text{Éq. 8}$$

Où :

n : est la porosité

D_a^0 : est le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air ($1,8 \times 10^{-5}$ m²/s à 25°C)

D_w^0 : est le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau ($2,5 \times 10^{-9}$ m²/s à 25°C)

Θ_a : est la teneur en air volumique du matériau

Θ_w : est la teneur en eau volumique du matériau

H : est la constante de Henry (0,03 à 25°C)

P_a et P_w : sont des paramètres reliés à la tortuosité (considérés constants à 3,3)

2.4.2.2. Recouvrements aqueux

Le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau (D_w^o) est 10 000 fois plus faible que celui de l'oxygène dans l'air (Aachib et al., 2002; Aubertin et al., 2015). De ce fait les recouvrements aqueux peuvent être utilisés pour limiter la diffusion de l'oxygène vers les résidus réactifs (Aubertin et al., 2015). Concernant les techniques utilisées comme barrière à l'oxygène, la première loi de Fick permet d'estimer le flux diffusif de l'oxygène (F) (Aachib et al., 2002; Aubertin et al., 2015) en utilisant l'expression de l'équation ci-dessous

$$F = - D_w^o \frac{\partial CO_2}{\partial Z} \quad \text{Éq. 9}$$

F : le flux diffusif de l'oxygène à l'intérieur du recouvrement en eau

D_w^o : le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau

δCO_2 : le gradient de concentration d'oxygène

δZ : l'élévation

Étant donné que l'oxygène se déplace à travers les recouvrements par diffusion moléculaire (Aubertin et al., 2015; Nicholson et al., 1989), le flux diffusif de l'oxygène à l'intérieur du recouvrement en eau noté (F), est donc fonction de la diffusion de l'oxygène dans l'eau (D_w^o) et du gradient de concentration (δCO_2) selon l'élévation (δZ) (Aubertin et al., 2015).

Ainsi, le recouvrement aqueux consiste à maintenir une épaisseur d'eau de 0,5 à 1 m (Julien et al., 2004; Mian & Yanful, 2004) au-dessus des résidus par des processus d'inondation de ces derniers, par le dépôt de ces rejets à l'intérieur de fosses déjà remplies d'eau et aussi par la déposition directement sous l'eau des résidus miniers à condition que ceux-ci ne soient pas déjà oxydés (Aubertin et al., 2015).

Cependant, cette méthode présente des inconvénients, tels que la remise en suspension des particules fines de ces rejets, susceptible de les oxygéner à cause des vagues et du vent (Aubertin et al., 2015; Awoh et al., 2013).

Notons également que lorsque les rejets miniers ont été préalablement oxydés, il est possible qu'ils constituent une menace de contamination pour les eaux de surface et souterraines en contact et au voisinage de la fosse dans laquelle ils sont déposés (Aubertin et al., 2015; Molson & Frind, 2012). Dans ce cas de figure, des processus de contrôle tels que : des tests de qualité au niveau de l'effluent finale pour les eaux de surface et des tests de qualité au niveau des piézomètres aux alentours de la zone potentiellement contaminée, devront être appliqués. En effet, ces tests de qualité, devront être appliqués, afin de garantir un suivi et prévoir une éventuelle neutralisation en cas de contamination, pour ainsi limiter l'évolution du drainage minier acide dans l'environnement à préserver (Aachib et al., 2002; Aubertin et al., 2015).

2.4.2.3. Recouvrement monocouche combiné avec une nappe phréatique surélevée

La couverture monocouche combinée avec une nappe phréatique surélevée est une technique qui consiste à faire remonter volontairement l'eau de la nappe phréatique, à une hauteur d'eau bien définie de sorte à maintenir les résidus saturés au-dessus de celle-ci par capillarité. Cela se fait après les avoir recouverts préalablement avec une couverture monocouche constituée de matériaux grossiers ou fins (Aubertin et al., 2015; Bussière & Guittonny, 2020). En effet, lorsque les résidus sont hautement saturés, dans la zone de saturation appelée la frange capillaire et que celle-ci a une épaisseur équivalente à la pression d'entrée d'air, les rejets miniers demeurent constamment dans un état de saturation. Ce qui empêchera l'oxygène de réagir avec ceux-ci et permettra de limiter la production du drainage minier acide (Aubertin et al., 2015; Dagenais, 2005; Pabst et al., 2011). L'étude des propriétés des résidus est donc cruciale, afin de connaître leurs différentes propriétés de rétention d'eau et leur pression d'entrée d'air, pour déterminer la profondeur de la nappe phréatique permettant ainsi, le maintien de la saturation des résidus miniers par capillarité au-dessus du niveau d'eau (Aubertin et al., 2015; Pabst et al., 2011).

Comme les résidus miniers tendent à se désaturer, cette méthode consiste à contrôler le bilan hydrique, plus particulièrement, en diminuant les pertes d'eau et en mettant en place des techniques qui vont accroître l'apport d'eau dans la structure, afin de maintenir un bilan hydrique positif (Aubertin et al., 2015; Bussière & Guittonny, 2020).

En fonction du rôle que peut jouer la couverture monocouche, celle-ci peut être de granulométrie grossière ou fine. En effet, lorsque la couverture monocouche est constituée de matériaux grossiers, ceux-ci doivent avoir une faible capacité de rétention d'eau et une grande conductivité hydraulique saturée, pour permettre la percolation de l'eau, tout en limitant les pertes (d'eau) occasionnées par évaporation (Cosset & Aubertin, 2010; Dagenais, 2005). Alors que, dans le scénario où la couverture monocouche est constituée de matériaux fins, ces derniers sont exposés aux fissures et à l'érosion. De plus, cette couverture ne parvient pas à limiter efficacement la remontée capillaire, bien qu'elle s'avère être efficace pour la rétention d'eau et la réduction du flux d'oxygène à travers la couverture (Bussière & Guittonny, 2020; Cosset & Aubertin, 2010).

Il est important de mentionner que dans la pratique, $\frac{1}{2}$ de l'AEV est utilisée pour des matériaux non oxydés (Bussière & Guittonny, 2020; Ouangrawa et al., 2009) alors que pour les résidus déjà pré-oxydés il est recommandé de saturer ces derniers jusqu'à leur surface (Pabst et al., 2018).

Après l'installation du recouvrement, la végétation mise en place dans le cadre de la restauration, favorisera la rétention d'eau des précipitations, et réduira le ruissellement au niveau du recouvrement monocouche, ce qui accentuera donc les pertes d'eau dans un recouvrement qui est censé conserver un bilan hydrique positif. Ce qui devient problématique (Bussière & Guittonny, 2020) et demandera donc, qu'une attention particulière soit accordée au type de végétation à développer, afin que celle-ci soit adaptée au type de recouvrement utilisé.

2.4.3 Barrière hydraulique

Dans cette section on présente les géomembranes, les géocomposites et les argiles. Les méthodes de restauration utilisant des barrières à l'eau consistent en l'utilisation de

recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée qui limitera la production d'acide tout en limitant la percolation de l'eau vers les résidus réactifs.

2.4.3.1. Recouvrements utilisant les géomembranes

Certains recouvrements utilisent des géomembranes, qui sont des matériaux généralement composés de thermoplastiques et d'élastomères. Le matériel communément utilisé pour les géomembranes est le polyéthylène à haute densité (PEHD) (Aubertin et al., 2015; Rarison et al., 2023).

Il est à noter également que l'étanchéité des géomembranes est fonction de la vitesse de percolation des fluides, dans la couche mince intacte faisant partie de sa structure. Cette vitesse est liée étroitement à la diffusivité et à la perméabilité de la géomembrane (Aubertin, 1995; Aubertin et al., 2015; Koerner, 2012).

Cependant, la formation de plis lors de l'exposition des géomembranes au soleil (Brachman, 2011; Brachman & Gudina, 2008; Rowe, 2012), les joints défectueux, ainsi que les dommages physiques causés lors de leur assemblage, peuvent gravement affecter le rendement de cette couverture (Aubertin et al., 2015; Bauters, 2015; Beck, 2013; McQuade & Needham, 1999).

Par ailleurs, les géomembranes ont des durées de vie courtes (Hsuan et al., 2008), ce qui n'est généralement pas approprié pour les sites miniers en fermeture, qui exigent une durée plus longue pour les recouvrements miniers (Aubertin et al., 2015; Robertson, 2011), (pour des raisons environnementales et économiques).

2.4.3.2. Recouvrements utilisant les géocomposites bentonitique

Les géocomposites bentonitique (GCB) sont des matériaux de recouvrement généralement manufacturés et composés d'une double couche de géotextile renfermant en leur sein une couche de bentonite d'une densité comprise entre 3 et 5 kg /m³(Aubertin et al., 2015). Cette bentonite contient de la montmorillonite, dont la nature chimique peut-être sodique ou potassique, permettant ainsi de faire la différence entre les types de bentonite utilisée (Booker et al., 2004; Maqsood et al., 2021).

Les GCB sont des matériaux qui, lorsqu'ils ne subissent aucun dommage, possèdent des conductivités hydrauliques se situant aux environs de 10^{-11} m/s (Aubertin et al., 2015). Cette caractéristique leur confère donc la possibilité de limiter la percolation de l'eau vers les résidus réactifs (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 2015). L'épaisseur des GCB est comprise entre 0,49 et 1,29 (cm) (Dickinson & Brachman, 2008). Cette épaisseur doublera après l'hydratation de la bentonite, à cause des propriétés de gonflement de la fraction argileuse, présente à l'intérieur de ce recouvrement (Aubertin et al., 2015; Komine & Ogata, 1994; Sivapullaiah et al., 1996). On parlera notamment de la capacité de rétention des molécules d'eau entre les feuillets de la montmorillonite qui est un minéral argileux utilisé dans la composition de la bentonite (Boulanger-Martel, 2015; Holtz & Kovacs, 1991). De plus cette propriété de gonflement due à l'hydratation de la bentonite dans les géocomposites permet aux GCB de « s'auto-sceller » (Aubertin et al., 2015), ce qui constitue un avantage économique.

Les dommages subvenant pendant la mise en place des GCB et l'acidité de l'eau en contact avec celles-ci (dans le cadre de pluies acides ou de remontées des eaux du DMA) sont des facteurs qui influencent négativement la conductivité hydraulique de ces recouvrements et par conséquent leurs rendements quant à leurs capacités à agir comme barrières à l'eau (Aubertin et al., 2015; Liu et al., 2013).

2.4.3.3. Recouvrements utilisant des couches de sols fins

Les matériaux, généralement utilisés comme couche de sols fins, sont des matériaux composés de grains de petite taille, ayant une faible conductivité hydraulique. De ce fait, une k_{sat} de 10^{-9} m/s est généralement recommandée, afin que ces recouvrements constituent une barrière à l'eau (Aubertin et al., 2015; Bussière et al., 2007; Maqsood et al., 2021). Cependant, les silts ayant une faible plasticité sont le plus souvent utilisés, parce que les argiles comme ceux de l'est du Canada sont difficiles à manipuler à cause de leur grande teneur en eau et de leur sensibilité aux effets de gel-dégel. Cette sensibilité en pratique se manifeste par l'apparition de fissures dans leurs structures. Ces fissures constituent des chemins préférentiels pour l'infiltration de l'eau et la diffusion moléculaire de l'oxygène dans le recouvrement (Aubertin et al., 2015; Bussière et al., 2007; Chapuis,

2002; Chapuis et al., 2006). Notons également que les matériaux argileux, en raison de leur faible perméabilité, sont généralement utilisés comme tapis d'étanchéité dans les sites d'entreposage (Aubertin et al., 2015; Chapuis, 2002) et peuvent être associés avec des géomembranes ou des géocomposite bentonitique, dans des configurations, afin d'améliorer le rendement de ces recouvrements (à condition d'être compactés selon les limites de consistance d'Atterberg requises) (Aubertin et al., 2015; Ayadat & Ouali, 1999; Gudina & Brachman, 2006).

Les propriétés qui doivent être satisfaites pour l'utilisation d'argile comme un matériel de recouvrement ayant une faible conductivité hydraulique, sont :

- Les matériaux argileux doivent contenir moins de 50% de graviers.
- Les limites de liquidités des matériaux devront être supérieures à 20%.
- Les indices de plasticité devront être supérieurs à 7% (mais en cas de potentielle exposition des matériaux aux cycles de mouillage-séchage et de gèle-dégel cet indice devra être inférieur à 20 %).
- La fraction argileuse (particules sont inférieures à 2 microns) doit être supérieure à 15%.
- Les pourcentages des particules fines devront être supérieurs à 30%.
- Les conductivités hydrauliques saturées des matériaux devront être inférieures ou égales à 10^{-9} m/s (Maqsoud et al., 2021) (Bussière & Guittonny, 2020) (Dickinson & Brachman, 2008).

Dans les sections suivantes les matériaux argileux seront décrits.

2.5 Les différents types de dépôts d'argiles, leurs classifications, structures et leurs propriétés respectives

2.5.1 Les types de dépôt d'argile au Québec

Les dépôts argileux du Québec comprennent des dépôts alluvionnaires, lacustres, glaciaux-lacustres, marins, glaciaux-marins et éoliens (Leroueil et al., 1983; Robitaille & Tremblay, 1997).

En effet, les argiles sont de très fines particules qui lorsqu'elles sont en suspension dans les fleuves, les rivières et leurs embouchures, se déposent au fur et à mesure que les débits des eaux diminuent. Elles se déposent, surtout lors de la baisse du niveau d'eau après les crues, afin de former des dépôts alluvionnaires associés à des couches de silts et souvent répandus dans les plaines (Robitaille & Tremblay, 1997). On pourrait citer à titre d'exemple, la plaine alluviale de Matane au Québec.

Les dépôts lacustres d'argile, sont constitués de couches alternées épaisses, de silts et de fines couches d'argile formant ainsi, des structures varvées (Robitaille & Tremblay, 1997). Ces particules se déposent par gravité pendant les périodes hivernales, alors que la surface des lacs est gelée et que, la turbulence des eaux est réduite. Par ailleurs, lorsque les eaux de fonte des glaces sont piégées au pied des sédiments de moraine composés de tills, elles forment des lacs dans lesquels les dépôts d'argiles et de silts vont se faire. Ces dépôts sont désignés par des dépôts « glaciaux-lacustres » (Robitaille & Tremblay, 1997), comme les dépôts argileux des lacs Ojibway et Abitibi au Québec (Ménard, 2012).

Les dépôts marins d'argile, quant à eux, s'effectuent par agglomération sous forme de flocons de fines particules d'argile associés à des silts. Cela est possible, grâce au sel contenu dans l'eau de mer, qui agit comme agent flocculant.

Par la suite, ces flocons devenus plus volumineux parviennent à se déposer par gravité dans les fonds marins. Ils sont à ce moment très liquéfiable et sensible au remaniement en raison de leur grande teneur en eau, ce qui pourrait entraîner souvent des tassements (Robitaille & Tremblay, 1997).

Le Québec possède de vastes dépôts d'argile marine sensibles à l'instar les dépôts « glaciaux-marins » dans les régions de la Côte-Nord, de Saint Laurent, de Québec, de Saguenay et enfin du Lac-Saint-Jean qui se sont formés dans les mers glaciales notamment « Goldthwaith » et de « Champlain » (Robitaille & Tremblay, 1997).

Les dépôts éoliens d'argiles appelés « loess » se forment quant à eux dans les zones arides lorsque les particules fines telles que les silts, les argiles et les sables fins sont transportés par le vent et se déposent autour de la végétation. Les particules sont à ce moment, arrêtées

dans leurs élans par la végétation qui les stoppent, dans leurs mouvements, pour ainsi former autour d'elles un dépôt jaunâtre. On retrouve généralement ce genre de formation dans la baie de Hudson, les Iles de la Madeleine et le long du littoral de la Côte-Nord (Québec) (Robitaille & Tremblay, 1997).

2.5.2 Classifications des argiles

On distingue trois classifications des argiles : 1) la classification géotechnique des argiles, qui permet de classer les argiles en se basant sur leurs granulométries et leurs limites d'Atterberg (limites de liquidités et de plasticités) (Holtz & Kovacs, 1991); 2) la classification en ingénierie des argiles, qui les identifie comme des matériaux ayant des particules, dont le diamètre a une taille inférieure à 2 μm (Maqsoud et al., 2021); et 3) la classification minéralogique de ces dernières, selon laquelle, les argiles sont des minéraux organisés dans des structures cristallines microscopiques et dans des configurations, sous forme de feuillets, composés d'unités cristallines communément appelées structures fondamentales (Delage & Cui, 2000; Maqsoud et al., 2021; Robitaille & Tremblay, 1997).

2.5.3 Structures des argiles

La structure des argiles est construite à partir des liaisons entre les cations de silicium (Si^{4+}) et les anions d'oxygènes (O^{2-}) (van Damme, 2013). On distingue deux types de structures fondamentales concernant les feuillets d'argiles, notamment la structure fondamentale tétraédrique et la structure fondamentale octaédrique.

La structure tétraédrique du feuillet d'argile, s'organise de sorte que quatre ions d'oxygène (O^{2-}) encadrent l'ion de silicium (Si^{4+}), situé au centre de cette configuration, afin de former un polyèdre ou un tétraèdre à quatre sommets. Lorsqu'un atome de silicium (Si^{4+}) est remplacé par un atome d'aluminium (Al) dans la structure fondamentale tétraédrique, cette substitution est dite isomorphe, à cause des tailles relativement similaires des atomes de silicium (Si^{4+}) et d'aluminium (Al) (Robitaille & Tremblay, 1997). Tandis que le feuillet d'argile avec une structure fondamentale octaédrique comprend six ions d'oxygène (O^{2-}) ou de molécules d'hydroxyde (OH), arrangées en un octaèdre composé d'aluminium (Al), ou de magnésium (Mg), pouvant être substituées toutes les deux, par des atomes de

fer (Fe), de nickel (Ni), de titane (Ti), de lithium (Li) ou de chrome (Cr) (Robitaille & Tremblay, 1997).

Les couches de feuillet tétraédrique et octaédrique dans les argiles (Figure 6) s'organisent de différentes manières et permettent de différencier les types d'argiles et leur propriété respective (Figure 7).

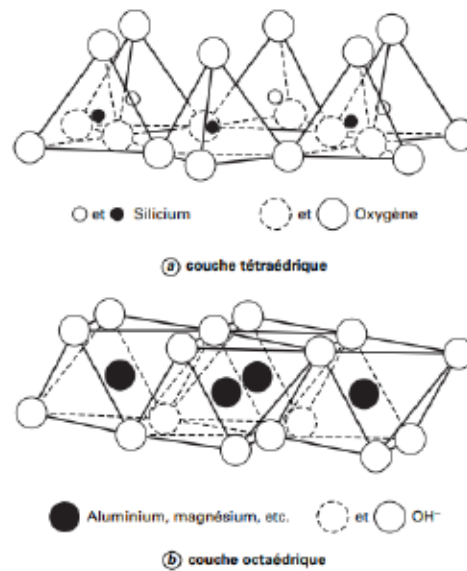


Figure 6 Couche tétraédrique et octaédrique des argiles (Delage & Cui, 2000)

2.5.4 Types d'argile et leurs propriétés respectives

Les couches tétraédrique (T) et octaédrique (O) s'organisent de différentes façons. En effet, la couche octaédrique (O) lorsqu'elle est superposée au-dessus de la couche tétraédrique (T), elle forme avec cette dernière un minéral de deux couches de type 1 :1 (TO). Aussi la couche octaédrique (O) peut être prise en sandwich entre deux couches tétraédriques (T) pour former un minéral de trois couches de type 2 :1 (TOT). De plus, la couche octaédrique (O) peut être prise entre deux couches tétraédriques (T), constituant ainsi, un complexe a trois couches superposées au-dessus d'une couche octaédrique (O), afin de former un minéral de quatre couches de type 2 :1 :1 (TOTO).

On distingue généralement trois grands groupes d'argiles (selon la séquence d'empilement des couches tétraédrique et octaédrique) : le groupe des minéraux argileux de types 1 :1 (TO) (Kaolinite), le groupe des minéraux argileux de types 2 :1 (TOT) (Montmorillonite ou Smectite, illite) et enfin le groupe des minéraux argileux de types 2 :1 :1 (TOTO)(Chlorite) (Barton & Karathanasis, 2002; Brady, 1990; Grim, 1968; Xi et al., 2007).

La kaolinite (TO) est un minéral argileux de couleur blanchâtre possédant des couches élémentaires propres à sa structure. Elle est formée de feuillets tétraédriques (T) et octaédriques de « gibbsite » (O), ayant des épaisseurs d'environ 0,7 (nm) (Delage & Cui, 2000; Robitaille & Tremblay, 1997). Ces couches sont liées par des ions d'hydrogène, qui agissent sur les atomes d'hydroxyde et d'oxygène. Les feuillets tétraédriques et octaédriques respectivement, ont de forts liens d'hydrogène qui permettent au dépôt argileux d'être quasi imperméable à cause de la résistance qu'ils opposent, face à l'infiltration de l'eau entre leurs couches (Delage & Cui, 2000; Robitaille & Tremblay, 1997). Bien que les strates fondamentales de la kaolinite aient la capacité de s'étendre en longueur et en largeur, elles ont cependant la possibilité de s'empiler les unes sur les autres, justifiant ainsi la faible surface spécifique de ce minéral argileux. Ceci se manifeste par un faible taux de substitutions isomorphes et par conséquent une faible activité électrochimique et un faible gonflement par rapport à l'illite et la montmorillonite. En outre, les couches de la kaolinite ont les liens hydrogènes les plus faibles parmi les minéraux argileux. Aussi, les dépôts de kaolinite se situent la plupart du temps dans les zones tropicales et possèdent des propriétés et une structure presque similaire à celle des « halloysite » (Robitaille & Tremblay, 1997).

La montmorillonite ou smectite (TOT), est un minéral argileux assez répandu, qui est composé de plusieurs couches élémentaires formées par deux feuillets tétraédriques (T), qui sont situées aux extrémités respectives d'un feuillet octaédrique (O) de gibbsite (Robitaille & Tremblay, 1997). Ces couches élémentaires peuvent s'étendre aussi bien en largeur qu'en longueur, et ont une épaisseur d'environ 0,96 nm ou 1 nm (Delage & Cui, 2000; Robitaille & Tremblay, 1997). La montmorillonite se caractérise par une grande

surface spécifique. Cette caractéristique favorise un grand nombre de substitutions isomorphes, qui font de ce minéral argileux, celui qui a la plus forte activité électrochimique. Cette activité favorisera la forte attraction des molécules d'eau qui assureront le lien entre les couches élémentaires de ce minéral. La montmorillonite possède la propriété de gonflement la plus importante parmi les minéraux argileux, bien que les liens entre ses couches élémentaires soient l'un des plus faibles, en raison du fait qu'ils sont assurés uniquement par des molécules d'eau. D'ailleurs, la bentonite a des propriétés semblables à celle de la montmorillonite et elle est utilisée dans la confection de géocomposites bentonitique pour les recouvrements miniers (Robitaille & Tremblay, 1997).

L'illite (TOT) est un minéral argileux abondant sur le globe terrestre, qui fait partie de nombreux dépôts d'argile marine post-glaciaire du Québec. Ce minéral argileux se caractérise, par sa structure composée d'un feuillet octaédrique (O) piégé entre deux feuillets tétraédriques (T), constituant une couche élémentaire d'environ 1 nm. Bien que similaire à la montmorillonite, cette structure de l'illite se distingue à la fois par des liens de potassium (K) plus importants que ceux de la montmorillonite, mais également plus faibles que les liens hydrogènes des kaolinites (Robitaille & Tremblay, 1997). L'illite a des surfaces spécifiques, des taux d'échanges isomorphes, des activités électrochimiques et des taux de gonflements supérieurs à ceux de la kaolinite, mais inférieurs à ceux de la montmorillonite (Robitaille & Tremblay, 1997).

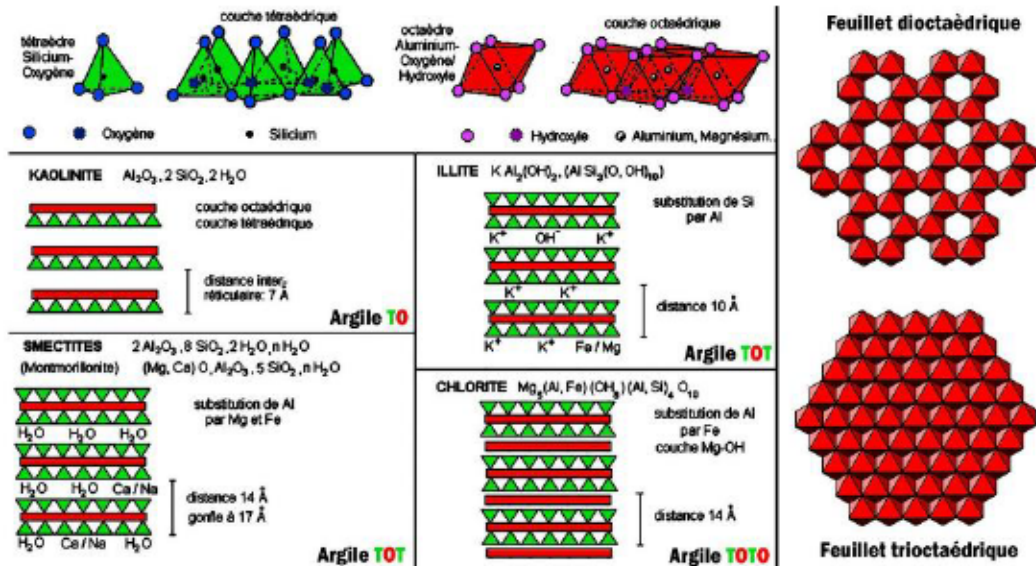


Figure 7 Structure des feuillets des différents types d'argiles (le-comptoir-geologique.com)

2.6 Propriétés de base

Dans cette section, les propriétés de base, telles que la porosité (n), l'indice de vide (e), la teneur en eau gravimétrique (w), la densité relative des grains (G_s), le degré de saturation (S_r) et la teneur en eau volumique (Θ), qui sont utilisées dans la caractérisation des sols seront définies dans les sections suivantes.

2.6.1 Porosité (n)

La porosité (n) est définie comme étant le rapport du volume des vides sur le volume total d'un échantillon à étudier (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) tels que :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Éq. 10}$$

Avec :

V_v : le volume des vides en (m^3)

V_t : le volume total en (m^3)

2.6.2 Teneur en eau gravimétrique (w)

La teneur en eau gravimétrique (w), représentant la teneur en eau massique d'un matériau. La teneur en eau massique ou pondérale d'un matériaux est définie comme le rapport entre la masse de l'eau (M_w) et la masse sèche des matériaux (M_s) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) :

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad \text{Éq. 11}$$

Avec :

M_w : La masse de l'eau (kg)

M_s : La masse sèche du matériau (kg)

2.6.3 Densité relative des grains (G_s)

La densité relative des grains (G_s) est formulée comme étant le ratio de la masse volumique des grains solides (ρ_s) par rapport à la masse volumique de l'eau (ρ_w) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) :

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \text{Éq. 12}$$

Avec :

ρ_s : La masse volumique des grains solides ($N.m^{-3}$)

ρ_w : La masse volumique de l'eau ($N.m^{-3}$)

2.6.4 Degré de saturation (S_r)

Le degré de saturation se définit comme étant, le rapport entre le volume d'eau (V_w) et le volume des vides (V_v) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{Éq. 13}$$

Avec :

V_w : le volume d'eau (m^3)

V_v : le volume des vides (m^3)

Le degré de saturation est un ratio pouvant aussi être exprimé en fonction de la teneur en eau gravimétrique (w), du (G_s), de la densité de l'eau (ρ_w) et de la densité du sol sec (ρ_{dry}). Cette expression du degré de saturation est illustrée, à travers l'équation suivante (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) :

$$S_r = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_{dry}} - \frac{1}{G_s}} = \frac{w}{\rho_w \left(\frac{\rho_s}{\rho_{dry}} - 1 \right)} \quad \text{Éq. 14}$$

Avec :

ρ_w : La masse volumique de l'eau ($kg.m^{-3}$)

ρ_{dry} : La masse volumique du sol sec ($kg.m^{-3}$)

G_s : La densité relative des grains solide

2.6.5 Indice des vides (e)

L'indice des vides (e) est un ratio représentant le volume des vides par rapport au volume des grains solides (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977) tels que :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Éq. 15}$$

Avec :

V_v : le volume des vides en (m^3)

V_s : le volume des grains en (m^3)

Cet indice peut aussi être exprimé en fonction de la porosité (n), ou de la teneur en eau gravimétrique (w), de la densité relative des grains (G_s), et du degré de saturation (S_r) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977).

Ces expressions sont présentées ci-dessous :

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{w \times G_s}{S_r} \quad \text{Éq. 16}$$

Avec :

n : La porosité

w : La teneur en eau gravimétrique des matériaux

G_s : La densité relative des grains solides

S_r : Le degré de saturation

Cependant la porosité peut être aussi exprimée en fonction de l'indice des vides (e) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977):

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{Éq. 17}$$

2.6.6 Teneur en eau volumique (θ)

La teneur en eau volumique (θ) se définit comme étant le ratio du volume d'eau (V_w) par rapport au volume total de l'échantillon (V_t) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977), tel que :

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{Éq. 18}$$

Avec :

θ : La teneur en eau volumique de l'échantillon

V_w : Le volume d'eau de l'échantillon (m^3)

V_t : Le volume total de l'échantillon en (m^3)

La teneur en eau volumique (θ) est une teneur, pouvant être exprimée en fonction de la porosité et du degré de saturation ou, en fonction de la teneur en eau gravimétrique (w), de la porosité (n) et de la densité relative (G_s), ou encore en fonction de la teneur en eau gravimétrique, de la masse volumique du matériau sec (ρ_{dry}) et de la masse volumique de l'eau (ρ_w).

Ces différentes expressions sont illustrées, à travers les relations suivantes (Bussière & Guitttonny, 2020) :

$$\theta = n \times S_r = w \times (1 - n) \times G_s = w \frac{\rho_{dry}}{\rho_w} \quad \text{ q. 19}$$

Il est important de rappeler que, tous ces paramètres, sont influencées par la granulométrie des matériaux (Bussière & Guitttonny, 2020; Salager, 2007), qui est un donc un paramètre important à considérer.

2.6.7 Limites d'Atterberg

Les argiles sont des minéraux assez cohérents qui se distinguent par leur limite d'Atterberg, notamment leur limite de retrait, de liquidité et de plasticité (Bussière & Guitttonny, 2020; Robitaille & Tremblay, 1997).

2.6.7.1. Limite de liquidité

La limite de liquidité (w_L) correspond à la teneur en eau délimitant l'état liquide de l'état plastique d'un sol. C'est la teneur en eau pondérale, généralement exprimé en pourcentage, au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

2.6.7.2. Limite de plasticité

La limite de plasticité (w_p) correspond à la teneur en eau, séparant l'état plastique de l'état semi-solide (avec retrait) d'un sol.

2.6.7.3. Limite de retrait

La limite de retrait est la teneur en eau délimitant l'état solide (sans retrait) de l'état semi-solide d'un sol. Elle correspond à la teneur en eau maximale, que peut avoir un sol sans changer de volume.

2.6.7.4. Indice de plasticité

L'indice de plasticité tout comme l'indice de liquidité sont aussi utilisés dans le processus d'identification de l'état des sols. En effet, l'indice de plasticité (I_p) permet de définir la zone dans laquelle un sol est à l'état plastique (Delage & Cui, 2000; Robitaille & Tremblay, 1997). Cet indice est déterminé par la relation suivante :

$$I_p = w_L - w_p \quad \text{Éq. 20}$$

Avec,

I_p : L'indice de plasticité

w_L : La limite de liquidité

w_p : La limite de plasticité

Plus un sol est plastique, plus il contiendra de l'argile et plus son indice de plasticité est élevé (Robitaille & Tremblay, 1997); il est donc primordial de connaître ce paramètre afin de mieux définir le type de sol à étudier. Les indices de plasticité des argiles ont des valeurs minimales de 11 (McCarthy, 1977).

Aussi, l'indice de liquidité (I_L) permet de définir la zone dans laquelle un sol est à l'état liquide, plastique, semi-solide ou solide (Robitaille & Tremblay, 1997). Cet indice est exprimé par la relation suivante :

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} \quad \text{Éq. 21}$$

Avec :

I_L : L'indice de liquidité

w : La teneur en eau naturelle du sol

w_p : La limite de plasticité

I_p : L'indice de plasticité

Pour un indice de liquidité inférieur à 0, le sol est à l'état solide ou semi-solide. Lorsque l'indice de liquidité varie de 0 à 1, le sol est à l'état plastique et enfin lorsque cet indice est supérieur à 1, le sol étudié est défini comme étant à l'état liquide (Robitaille & Tremblay, 1997).

2.6.7.5. Indice de consistance

L'indice de consistance I_c est généralement utilisée pour indiquer la consistance des matériaux.

En effet la consistance des matériaux varie de liquide ($I_c \leq 0$) à très consistant ($I_c > 1$) (Holtz & Kovacs, 1991; McCarthy, 1977). De plus, cet indice de consistance est exprimé par la relation suivante :

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \quad \text{Éq. 22}$$

Avec :

I_c : L'indice de consistance

w : La teneur en eau naturelle du sol

w_L : La limite de liquidité

I_p : L'indice de plasticité

2.6.8 Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux

Concernant les minéraux argileux, il est à noter que, plus la surface spécifique de leurs particules est grande, plus le nombre de substitutions isomorphes est élevé au sein de leur structure. Par conséquent, l'activité électrochimique de ces minéraux sera davantage augmentée (Robitaille & Tremblay, 1997). Cette activité électrochimique se caractérise notamment par la présence de charges négatives à la surface des particules argileuses, résultant d'échanges chimiques. Ces dernières, pour se stabiliser, attirent les molécules contenant des ions positifs, notamment les cations contenus dans l'eau et dans le sol (Robitaille & Tremblay, 1997).

Cette activité électrochimique peut être quantifiée à travers l'équation mathématique de Skempton (Robitaille & Tremblay, 1997; Skempton, 1953) définie par :

$$Ac = \frac{I_p}{\text{Fraction d'argile}} \quad \text{Éq. 23}$$

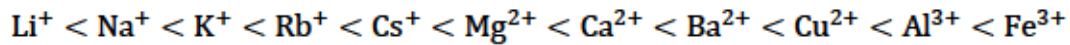
Avec :

Ac: L'activité colloïdale d'une argile

I_p : L'indice de plasticité

Fraction d'argile : le pourcentage représentant le poids des particules inférieur à 2 (μm) dans le sol sec de particules de diamètres inférieur à 400 microns ($< 0,4 \text{ mm}$) selon la norme ASTM (Robitaille & Tremblay, 1997). Plus l'activité colloïdale d'une argile sera grande dans un sol, plus les molécules d'eau auront tendance à être attirées par cette argile dans ce dernier (sol). Par conséquent, plus la valeur de l'indice de plasticité sera grande, plus l'activité électrochimique de ce sol sera élevée. Ce qui entrainera une forte attraction des molécules d'eaux qui se traduit par une augmentation de l'indice de plasticité, pour un sol devenant de plus en plus plastique (Robitaille & Tremblay, 1997).

Les échanges entre les cations responsables de l'activité électrochimique des argiles se font selon un ordre « lyotropique » (excepté Na^+ et Ca^+) (Chevé, 2019; Robitaille & Tremblay, 1997) suivant la série définie ci-dessous :



Les échanges ioniques s'effectuent dans les argiles grâce à des cations, dont la dimension, le nombre et la valence exercent une influence notoire, sur ces substitutions, à cause notamment de l'existence de forces ioniques (I) (Chevé, 2019):

$$I = \frac{1}{2} \sum_i C_i Z_i^2 \quad \text{Éq. 24}$$

Avec,

I : La force ionique

Z_i : La charge

C_i : La concentration molaire (mol/l) de l'ion (i)

2.6.9 Forces de cohésion et de répulsions entre les minéraux argiles

Les minéraux argileux possèdent des forces d'attraction, notamment des forces de cohésion et des forces de répulsion, qui les distinguent particulièrement des autres minéraux (Robitaille & Tremblay, 1997). En effet, les particules d'argile s'attirent mutuellement grâce aux différences de charges électrochimiques, qui existent entre la surface de ce minéral et celles des cations présents dans l'eau libre et le film d'eau absorbé (Robitaille & Tremblay, 1997). La différence de charge entre les cations chargés positivement et la surface des minéraux argileux chargée négativement créent une forte attraction de l'eau qui circulait librement et devient absorbée. Ce qui favorise ainsi l'attraction des particules argileuse entre elles-mêmes (Robitaille & Tremblay, 1997). Par conséquent, plus l'épaisseur du film d'eau absorbé est petite, plus les minéraux seront rapprochés et leurs attractions mutuelles seront grandes (Robitaille & Tremblay, 1997). Cependant, il peut y avoir des forces d'attraction engendrées par la présence de matière organique ou

inorganique et, par l'apparition de charges positives à la surface des minéraux argileux, plus précisément à leurs extrémités, à cause de la séparation des molécules d'hydroxyde au niveau du point de rupture des couches élémentaires (Robitaille & Tremblay, 1997). Quant aux forces de répulsions, elles s'appliquent aux minéraux argileux qui se repoussent entre eux lorsqu'ils possèdent des charges de surface négatives similaires (Robitaille & Tremblay, 1997).

2.7 Limitations dans l'utilisation des argiles

Une des limitations majeures dans l'utilisation des argiles, comme matériaux de recouvrement, concerne les effets des cycles de gel-dégel. En effet, ces cycles modifient les structures et les propriétés des argiles (Maqsood et al., 2021). Cette modification se matérialise par l'apparition de fissures après les périodes de dégel. Les fissures sont dues aux pressions de succions exercées sur les molécules d'eau, lors du gel (Maqsood et al., 2021; Chamberlain, 1981). Elles contribueront à l'augmentation de la conductivité hydraulique saturée des argiles, facilitant ainsi la percolation de l'eau et la diffusion de l'oxygène, qui sont deux principaux facteurs à contrôler afin de limiter les réactions d'oxydation du drainage minier acide (Maqsood et al., 2021). Par conséquent, les paramètres à considérer pour limiter l'impact des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée des matériaux fins tels que les argiles sont : les pressions appliquées aux échantillons, le nombre de cycles de gel-dégel, la température de congélation, les teneurs en eau des matériaux argileux, la densité des matériaux argileux, les propriétés géotechniques et minéralogiques (Maqsood et al., 2021; Dagenais, 2005; Othman et al., 1994). Par ailleurs, les argiles peuvent subir des lessivages importants lors de l'écoulement des eaux de pluie à travers un phénomène, qui se caractérise par l'élimination progressive ou totale des cations métalliques (présents au sein des structures argileuses). Ce qui entraîne ainsi, une baisse des forces d'attractions ou de cohésions qui existent entre les argiles (Robitaille & Tremblay, 1997). Aussi, ces minéraux peuvent être liquéfiés, à la suite de la destruction des liens d'attractions, entre les particules argileuses, et ce, lorsqu'ils sont remaniés ou soumis à des séismes (à cause de leur teneur en eau naturelle) (Boulangier et al., 1998; Robitaille & Tremblay, 1997). La teneur en eau des minéraux argileux, et leurs

capacités de rétention d'eau sont donc des paramètres essentiels à prendre en considération dans l'utilisation de ce matériau cohérent.

2.8 Courbe de rétention d'eau (CRE)

2.8.1 Définition de la courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) se définit comme la relation entre la teneur en eau et la succion du sol (Williams, 1982). C'est un outil permettant d'étudier le comportement hydrique du milieu poreux, sur toute l'étendue d'une gamme de succions comprise généralement entre 0 kPa (état saturé) et 1×10^6 kPa (état supposé sec) (Salager, 2007).

La CRE permet de déterminer un point d'inflexion, appelé AEV (Air Entry Value) qui représente la valeur d'entrée d'air, plus particulièrement le point sur la courbe qui correspond à la pression sur l'échelle logarithmique de succion, à laquelle le matériau étudié commence à se désaturer (Bussière & Guittony, 2020). C'est une pression, à laquelle l'air remplace l'eau qu'occupaient les pores permettant ainsi son drainage vers le bas (Freeze & Cherry, 1979; Lavoie-Deraspe, 2019).

La méthode des tangentes est utilisée dans la détermination de l'AEV au niveau de la CRE (Fredlund & Xing, 1994). En effet, dans l'application de la méthode des tangentes, une ligne tangente est tracée au niveau de la CRE et une autre droite est tracée à partir de la valeur de saturation (voir Figure 8). Le point d'intersection entre cette ligne et la droite tangente à la zone d'inflexion de la CRE, est défini comme le point d'entrée d'air.

Un autre point peut être également déterminé au niveau de la CRE et qui correspond à la succion résiduelle (voir Figure 8). Cette succion résiduelle peut être définie, comme l'abscisse du point où la ligne tangente à la plage de succion élevée de la CRE et la ligne tangente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau se croisent (Fredlund & Xing, 1994).

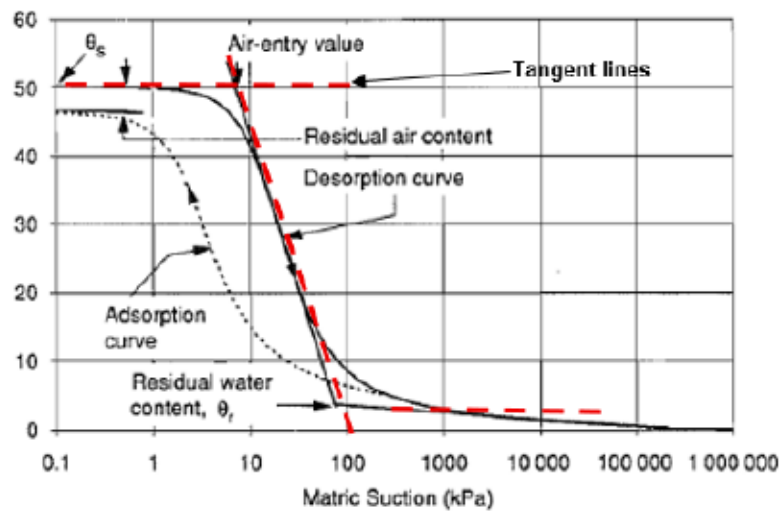


Figure 8 CRE typique d'un sol limoneux (adapté), illustrant la méthode des tangentes (Fredlund & Xing, 1994)

Par ailleurs, les courbes de rétention d'eau sont différentes pour chaque type de sol et se distinguent respectivement par des allures particulières.

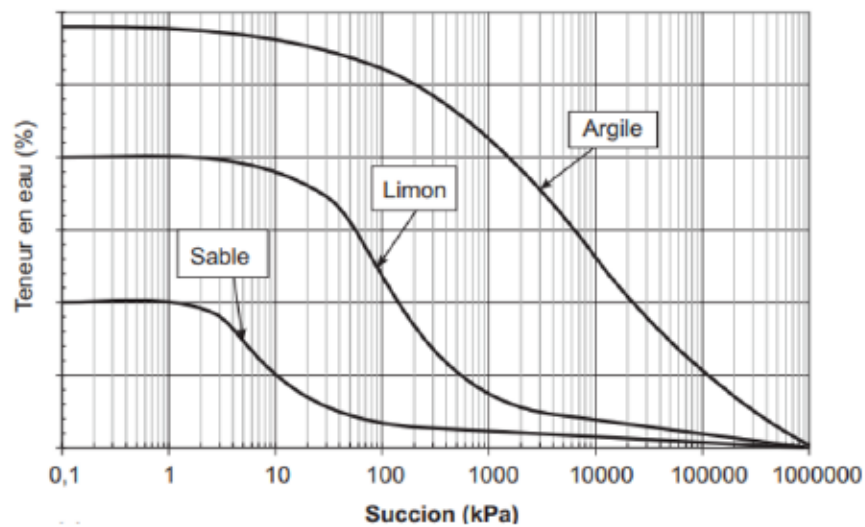


Figure 9 Courbe de rétention d'eau pour différents types de sol (Salager, 2007)

La Figure 9, présente l'allure plus étalée de la courbe de rétention d'eau de l'argile par rapport à celle du limon (silt) et du sable. Une allure qui s'explique par la granulométrie plus fine de l'argile comparativement à celle du limon et du sable. De ce fait, une plus

grande pression de succion sera requise pour l'argile, afin de permettre une entrée d'air et par conséquent une désaturation plus lente par rapport au sable et au silt (Salager, 2007).

Des études ont été menées sur l'influence de la température sur la CRE. Un modèle de prédiction de la courbe de rétention d'eau en fonction de la variation de la température a été développé par Salager et al., (2006). Mais ce modèle ne tient pas compte de la variation de la température en fonction de l'angle de mouillage (Salager et al., 2006).

Par ailleurs, Salager (2007) a pu démontrer que l'état hydrique d'un sol est défini par la différence de pression, entre la phase gazeuse et la phase liquide de ce dernier.

En somme, les facteurs pouvant affecter la courbe de rétention d'un matériel sont donc la porosité, la granulométrie et la température des matériaux étudiés (Romero & Vaunat, 2000; Salager, 2007; Salager et al., 2006).

2.8.2 Mesure de la CRE et l'influence de l'indice de plasticité

Concernant les méthodes d'évaluation en laboratoire de la courbe de rétention d'eau, le principe général est de mesurer la succion appliquée aux échantillons, pendant que leurs teneurs en eau correspondantes sont mesurées ou calculées. Il existe plusieurs méthodes, permettant de définir la courbe de rétention d'eau parmi lesquelles on trouve l'extracteur à pression, la tempe cell, les essais en colonnes, la méthode du papier filtre et enfin la méthode d'équilibre de pression de vapeur.

2.8.2.1. Extracteur à pression ou « pressure plate »

L'extracteur à pression est un instrument, permettant d'évaluer les teneurs en eau volumiques d'un échantillon saturé, qui se désature, après l'application de succions. La désaturation se produit, lorsque les pressions de succions, appliquées, commencent à forcer l'eau présente dans les pores des échantillons (préalablement saturés) à se déplacer et par conséquent, à être extraite vers le bas du cylindre métallique, dans lequel elle est maintenue (ASTMD6836-16, 2016).

2.8.2.2. Tempe cell

L'essai en laboratoire avec le « Tempe cell » est une méthode réalisée à 20°C ou à température ambiante sur un seul échantillon dans un cylindre en céramique de 85 mm de diamètre et, 60 mm de hauteur. Il est effectué avec le même principe de mesure que la pressure plate (ASTMD2325-68, 1997; Delage & Cui, 2000; Indrawan et al., 2006), mais les pressions appliquées sont plus faibles dans la pratique, car les matériaux plus grossiers ont besoin de moins de pression pour évacuer l'eau de leurs pores, lorsqu'ils sont saturés.

2.8.2.3. Essai en colonnes

Des sondes ou tensiomètres sont utilisés pour mesurer directement en temps réel les succions alors que les sondes de types 5TM sont utilisées pour les mesures des teneurs en eaux (Bussière & Guittouy, 2020; Maqsood et al., 2021).

Ces sondes sont installées au même niveau que ceux des tensiomètres (voir Figure 10).

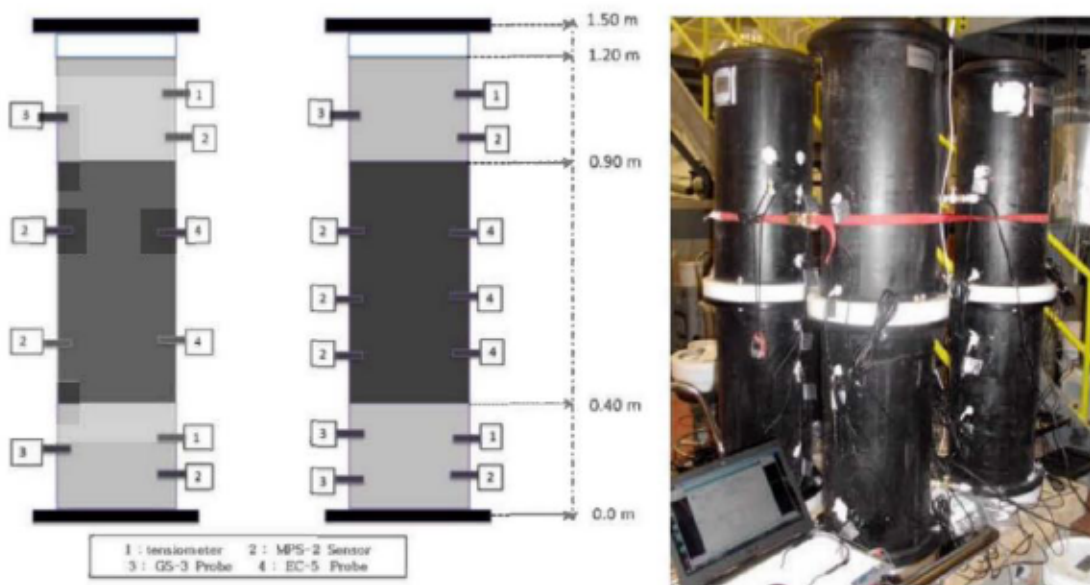


Figure 10 Colonnes expérimentales instrumentées pour les mesures des teneurs en eau volumiques et des succions (Kalonji, 2014)

2.8.2.4. Papier filtre

La méthode du papier filtre consiste à utiliser trois couches de papier filtre, dont la courbe de rétention d'eau est connue, avec un échantillon humide. Ces couches devront être déposées dans une éprouvette paraffinée, afin de conserver l'humidité de l'échantillon (Benchouk, 2005; Chevé, 2019).

Pour obtenir la succion de l'échantillon (lorsque l'équilibre est atteint dans un délai allant d'un à plusieurs jours, dépendamment de la nature du sol), on détermine dans un premier temps la teneur en eau du papier central grâce à un système de pesée assez précis.

Ensuite, la succion est obtenue à l'aide de la teneur en eau mesurée et de la courbe de rétention d'eau du papier (Benchouk, 2005; Chevé, 2019).

2.8.2.5. Méthode d'équilibre de pression de vapeur

La méthode d'équilibre de vapeur de pression est une méthode qui est utilisée lorsque les succions de plus de 3 MPa ou supérieures à 300 MPa, doivent être appliquées sur les matériaux à l'étude, afin d'évaluer leurs teneurs en eau (Chevé, 2019; Delage & Cui, 2000). Elle est plus souvent utilisée pour les argiles gonflantes (Tang & Cui, 2005). Dans la pratique, les échantillons sont conditionnés dans un dessiccateur hermétiquement fermé à une température de 20 C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) de sorte que de l'eau salée placée en dessous soit utilisée pour appliquer des succions sur l'échantillon par le phénomène de « transfert d'eau sous phase vapeur » (Benchouk, 2005; Chevé, 2019; Tang & Cui, 2005). Cependant, cette méthode est un essai de longue durée car une période allant d'un à deux mois est requise, avant que l'équilibre ne soit atteint (Benchouk, 2005; Chevé, 2019; Tang & Cui, 2005). Par ailleurs, le temps d'équilibre peut être réduit jusqu'à douze jours pour des essais réalisés sur du sable bentonitique. Ces essais consistent à faire circuler de l'air humide autour des échantillons (Blatz & Graham, 2000; Tang & Cui, 2005). La teneur en eau des échantillons est suivie par pesée (en moins de 15 secondes après le prélèvement d'un échantillon du dessiccateur, afin de négliger l'évaporation (Tang & Cui, 2005).

Ce suivi est effectué tous les 3 jours jusqu'à ce que le poids de l'échantillon soit stabilisé (Tang & Cui, 2005). Ainsi, la teneur en eau à l'équilibre est déterminée, lors du séchage de l'échantillon au four, à 150°C pendant 24 heures pour les argiles gonflantes (Tessier, 1984).

La Figure 11 illustre les composantes d'un système, utilisant la méthode d'équilibre de pression de vapeur.

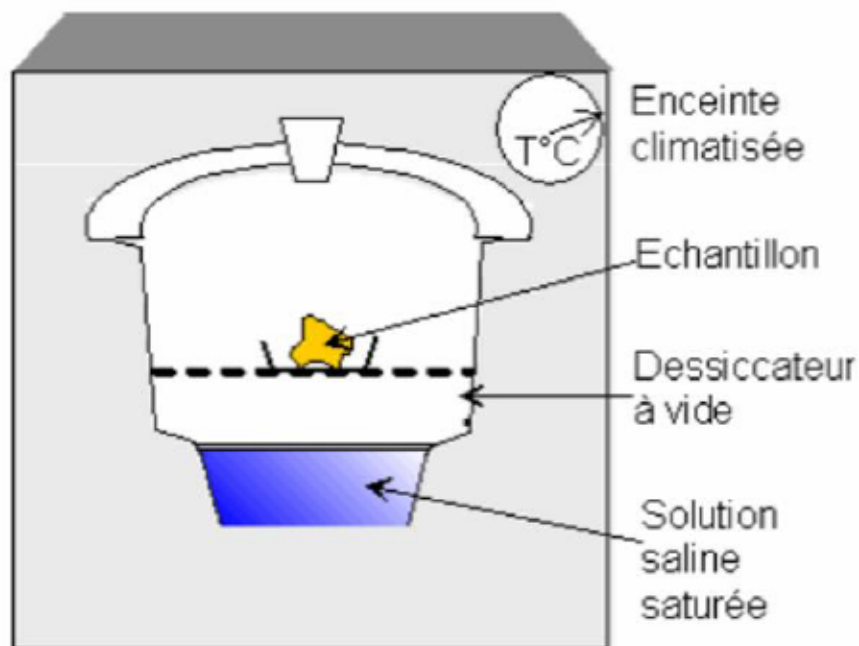


Figure 11 Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs (Benchouk, 2005)

2.8.3 Effets de l'indice de plasticité des sols argileux sur la CRE

Les argiles sont des matériaux ayant la possibilité de se rétracter, en se solidifiant lorsqu'ils deviennent secs et présentent un état plastique lorsque leurs teneurs en eau volumiques augmentent, jusqu'à atteindre la valeur de leur limite de liquidité avec des indices de plasticité allant de 0 à 10 % (Delage & Cui, 2000; Robitaille & Tremblay, 1997).

Plus l'indice de plasticité d'un sol est élevé, plus sa teneur en eau augmente (Delage & Cui, 2000) et plus l'allure de sa courbe de rétention d'eau sera étalée, lorsque des pressions de succions seront appliquées.

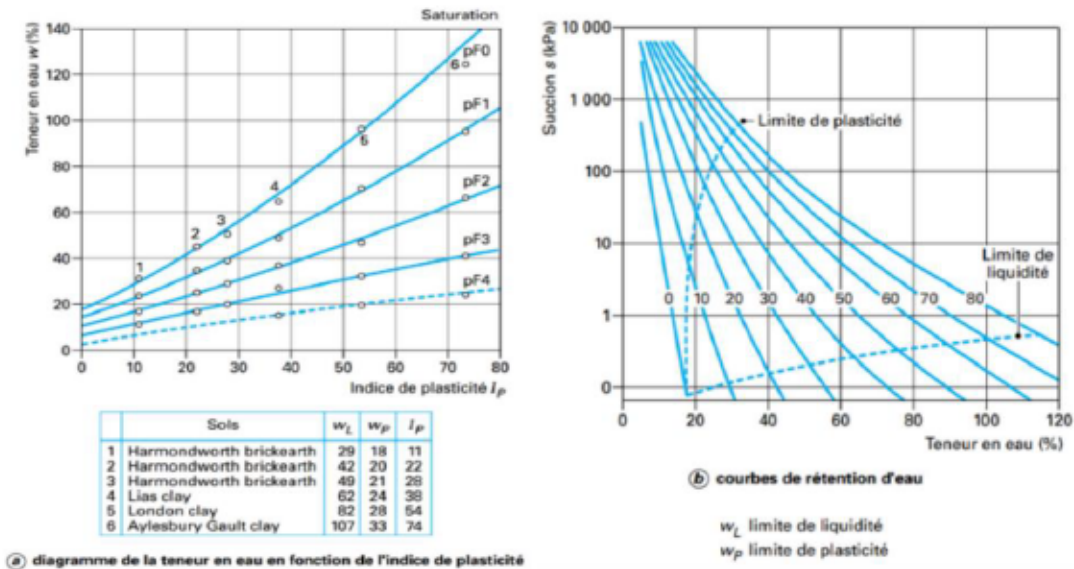


Figure 12 Effets de l'indice de plasticité sur la CRE de six sols britanniques (Delage & Cui, 2000)

La Figure 12 montre l'influence de la teneur en eau d'un sol sur son indice de plasticité (Aubertin et al., 2009; Bussière & Guittonny, 2020; Bussière et al., 2006; Dagenais, 2005; Maqsood et al., 2011; O'kane et al., 1998; Yanful et al., 1993).

En somme, la courbe de rétention d'eau des sols dépend de leurs propriétés respectives et le choix de la méthode de mesure de la courbe de rétention d'eau utilisée au laboratoire dépend de la succion recherch e et du temps disponible pour l'obtention des résultats.

En effet, certaines méthodes prennent plus de temps que d'autres et disposent de plages d'applications de succions typiquement définies.

Cependant, vu le temps que prennent les essais et les coûts engendrés quant à leurs réalisations, il est recommandé que celles-ci soient prédites en début de projet.

2.8.4 Méthodes descriptives de la courbe de rétention d'eau

Avant de présenter les modèles prédictifs, il est important de mentionner que les CRE peuvent être lissées à l'aide de modèles mathématiques dont les plus utilisés sont ceux de

Brooks et Corey (1964), de van Genuchten (1980) et de Fredlund et Xing (1994). Les descriptions des modèles sont présentées dans les équations 24, 25, 26 et 27.

2.8.4.1. Modèle de lissage de Brooks et Corey (1964)

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda_{BC}} \quad \text{Éq. 25}$$

θ_e : est la teneur en eau réduite

θ : est la teneur en eau volumique

θ_s : est la teneur en eau volumique à saturation

θ_r : est la teneur en eau volumique résiduelle

λ_{BC} : est le paramètre de lissage lié à l'agencement des pores

ψ_a : pression d'entrée d'air

Ψ : est la succion matricielle

2.8.4.2. Modèle de lissage de van Genuchten (1980)

$$\theta_e = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}} \right)^{m_v} + \theta_r \quad \text{Éq. 26}$$

α_v : est le paramètre du modèle $\cong (1/AEV)[L^{-1}]$

m_v et n_v : sont des constantes d'ajustement du modèle et m_v est souvent fixé par l'équation

$$(m_v = 1 - \frac{1}{n_v})$$

2.8.4.3. Modèle de lissage de Fredlund et Xing 1994

$$\theta = \left[\left(\frac{c(\psi)(\theta_s - \theta_r)}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi^{nf}}{af} \right) \right]^{mf}} \right) \right] + \theta_r \quad \text{Éq. 27}$$

Tels que :

$$c(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}} \quad \text{Éq. 28}$$

Avec :

mf et nf : constantes du modèle

e : nombre népérien (2,71828)

af : valeur approximative de AEV

ψ_r : succion à la teneur en eau résiduelle

$C(\psi)$: paramètre du modèle de Fredlund et Xing induisant une teneur en eau nulle lorsque $\psi = \psi_0 = 10^{-7}$ cm (Fredlund et Xing, 1994).

2.8.5 Méthode de prédiction de la courbe de rétention d'eau

Plusieurs modèles de prédiction de CRE ont été proposés par différents auteurs (Arya & Paris, 1981; Aubertin et al., 2003; Aubertin et al., 1998).

2.8.5.1. Modèle de prédiction d'Aya et Paris

Le modèle de Arya et Paris (1981) prédit la courbe de rétention d'eau à partir de paramètres simples tels que la distribution granulométrique par « discrétisation finie » et la porosité du sol (Campos-Guereta et al., 2021).

Mais la courbe de rétention d'eau prédite par ce modèle présente une forme discontinue en raison des paramètres de distribution granulométrique, utilisés par Aya et Paris (1981) (Campos-Guereta et al., 2021), compliquant ainsi son utilisation. Un modèle amélioré du modèle d'Aya et Paris a été proposé par Diez et al., (2021) (Campos-Guereta et al., 2021), afin d'obtenir une courbe de rétention d'eau pratique et continue (Campos-Guereta et al., 2021).

2.8.5.2. Modèle de prédiction de Kovàc modifié (MK)

Le modèle fréquemment utilisé dans la prédiction de la CRE, en raison de ses avantages est le modèle de Kovàc modifié "modified kovàc modele" ou « MK model » (Bussière & Guittonny, 2020) résultant de l'amélioration du modèle proposé par Kovàc en 1981 (Aubertin et al., 2003; Aubertin et al., 1998). En effet, le modèle MK prend en compte les phénomènes de rétention d'eau par adhésion et par capillarité tout en favorisant la prédiction de la courbe de rétention d'eau à partir de la courbe granulométrique, de l'indice de vide (e), ou de la porosité (n) pour les sols granulaires, et à partir de la limite de liquidité (w_l), de la densité relative des grains (G_s) et de l'indice des vides (e) ou de la porosité (n) pour les sols argileux (Aubertin et al., 2003; Aubertin et al., 1998; Bussière & Guittonny, 2020).

Concernant les sols granulaires, en utilisant le modèle MK modifié, la procédure consiste à d'abord définir et évaluer la remonté capillaire (h_{co}) en (cm) (Aubertin et al., 2003; Ait Khouia, 2018), à travers la relation :

$$h_{co} = \frac{0.75 \cos\beta_w}{e[D_{10}(1.17 \log(C_u) + 1)]} \quad \text{Éq. 29}$$

Avec,

h_{co} : La remonté capillaire en (cm)

β_w : L'angle de contact à l'interface entre l'eau et la surface solide

e : L'indice des vides

D_{10} : Diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique (cm)

C_u : Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$)

D_{60} : Diamètre des grains correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique (cm)

Pour $\beta_w = 0$ en drainage, $\cos\beta_w = 1$, alors l'équation précédemment définie pour déterminer la remonté capillaire (h_{co}), est reformulée.

Le degré de saturation ou les teneurs en eau sont exprimés par les formules suivantes (Aubertin et al., 2003; Bussière & Guittonny, 2020; Ait Khouia, 2018) en intégrant ces valeurs.

$$S_r = \frac{\Theta}{n} = 1 - (1 - S_a)(1 - S_c) \quad \text{Éq. 30}$$

$$\Theta = n \times [1 - (1 - S_a)(1 - S_c)] \quad \text{Éq. 31}$$

Avec :

S_r : Le degré de saturation

Θ : La teneur en eau volumique

n : La porosité

S_a : Le degré de saturation dû à l'adhésion

S_c : Le degré de saturation dû à la capillarité

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad \text{Éq. 32}$$

S_a^* : Une expression en fonction de la composante (S_a) due à l'adhésion et des « crochets de Macauley » (Aubertin et al., 2003), tels que ($0 \leq S_a^* \leq 1$).

« Les crochets de Macauley » utilisés dans la description de (S_a) ci-dessus (Aubertin et al., 2003) représentent une équation de la forme :

$\langle y \rangle = 0.5(y + |y|)$, ce qui implique que,

Pour $\langle y \rangle \geq 0$, $\langle y \rangle = y$ et que pour $\langle y \rangle < 0$, $\langle y \rangle = 0$

Et donc,

pour $S_a \geq 1$, $S_a^* = 1$ et pour $S_a < 1$, $S_a^* = S_a$ (Aubertin et al., 2003).

Ensuite, la composante (S_c) due à la capillarité (cm) est définie et évaluée pour les différentes valeurs de la succion (Ψ) (Aubertin et al., 2003) avec l'équation suivante :

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 \right] \quad \text{Éq. 33}$$

Avec :

S_c : Le degré de saturation dû à la capillarité

m : Le coefficient de distribution de la taille des pores, ou $m = 1/C_u$

Ψ : La valeur de suctions utilisées pour la prédiction (cm)

h_{co} : La remonté capillaire (cm)

Enfin, la composante (S_a) due à l'adhésion est définie et évaluée en (cm) pour les mêmes valeurs de succion utilisée dans le calcul de la composante due à la capillarité (S_c) (Aubertin et al., 2003) avec l'équation suivante :

$$S_a = a_c \left(\left(1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\Psi_0}{\Psi_r} \right)} \right) \frac{\left(\frac{h_{co}}{\Psi_n} \right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Psi}{\Psi_n} \right)^{\frac{1}{6}}} \right) \quad \text{Éq. 34}$$

Avec :

a_c : Le coefficient d'adhésion, avec $a_c = 0.01$

Ψ : La valeur de suctions utilisées pour la prédiction de la composante (S_c) en (cm)

Ψ_n : Le paramètre de normalisation

Ψ_0 : La valeur de succion à laquelle la teneur en eau du sols est nulle, $\Psi_0 = 10^7$ cm d'eau

h_{co} : La remonté capillaire en (cm)

Ψ_r : La suctions résiduelles en (cm), tels que, $\Psi_r = 0.86 h_{co}^{1.2}$

Ainsi, lorsque la succion augmente, jusqu'à une valeur assez élevée ($\Psi = \Psi_0 = 10^7$ cm d'eau) où le sol est supposé sec ($\Theta = 0$), les suctions résiduelles sont définies à l'aide de

l'expression de (Ψ_r) dans le modèle « MK » et, représentent la pression à exercer pour atteindre les valeurs des teneurs en eau résiduelles (Aubertin et al., 2003).

Pour les matériaux compressibles, un modèle « MK_d » est utilisé pour prédire une courbe d'indice de vide en fonction de la succion grâce aux propriétés géotechniques des matériaux à étudier (Mbonimpa et al., 2006a). Cette courbe, après avoir été prédite par ce modèle, est utilisée dans l'évaluation de la composante S_a et S_c (S_c) (Mbonimpa et al., 2006a) afin de représenter une courbe de retrait volumique illustrant le phénomène de compressibilité.

Ce phénomène affecte le volume du sol car les pressions de succions agissent comme des forces de compressions diminuant ainsi le volume du sol au fur et à mesure que leurs valeurs augmentent. Dans ce cas, l'indice des vides devient une fonction de la succion (Mbonimpa et al., 2006a).

Pour les sols argileux, une modification a été apportée au niveau de l'estimation de la remontée capillaire. Ainsi, la formule proposée est présentée par l'équation ci-dessous (Mbonimpa et al., 2006b):

$$h_{co,P} = \frac{0.15 \rho_s}{e} w_L^{1.45} \quad \text{Éq. 35}$$

Avec,

$h_{co,P}$: La remontée capillaire des matériaux plastiques en (cm)

ρ_s : La densité des grains solide en (kg/m³)

e : L'indice des vides

w_L : La limite de liquidité

Le modèle de MK a été aussi modifié afin de prendre en compte la prédiction des effets d'hystérésis (Maqsood et al., 2006, 2012).

2.9 Conductivité hydraulique saturée de l'argile

2.9.1 Définition de la conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée se définit comme étant la vitesse d'écoulement de l'eau en milieu saturé, elle est notée (k_{sat}) dans la littérature. Elle est exprimé en m/s ou cm/s (Bussière & Guittonny, 2020). La conductivité hydraulique saturée est aussi définie comme étant un coefficient de perméabilité qui est une caractéristique importante puisqu'elle est utilisée également dans la prédiction de l'écoulement de l'eau à travers les pores des matériaux saturés (Bussière & Guittonny, 2020).

Les facteurs influençant la variation du coefficient de perméabilité, selon le type de sols, sont la granulométrie, l'indice des vides, la viscosité dynamique et le degré de saturation (Robitaille & Tremblay, 1997).

La k_{sat} peut être mesurée au laboratoire ou prédite avec différents modèles. Au laboratoire, les mesures peuvent être réalisées à l'aide du perméamètre à parois rigides pour les matériaux grossiers, et à l'aide du perméamètre à parois flexibles pour les matériaux fins.

2.9.2 Mesure de la conductivité hydraulique saturée

2.9.2.1. Perméamètre à parois rigides

Le perméamètre à parois rigides est utilisé pour effectuer des tests de perméabilité à charge constante et, à charge variable sur des matériaux grossiers.

Le test à charge constante est appliqué aux sols granulaires contenant moins de 10% de sols passant dans le tamis numéro 200, dont les mèches ont une largeur de 75 microns (μm) (ASTMD2434, 1997; Robitaille & Tremblay, 1997).

2.9.2.2. Perméamètre à parois flexibles

Le perméamètre à parois flexibles est utilisé pour effectuer des tests de perméabilité, sur des matériaux fins susceptibles de subir des déformations lors de leurs saturations. C'est pourquoi, d'après la littérature, une membrane faisant office d'une paroi flexible est utilisée pour mener à bien ce test (ASTM, 1997).

En effet, le test à charge constante pour le perméamètre à parois flexibles est appliqué aux sols fins intacts ou remaniés, ayant une conductivité hydraulique inférieure à 1×10^{-7} (m/s) (ASTM, 1997).

Il est important de mentionner que les mesures de la conductivité hydraulique saturée requièrent une bonne planification qui implique la prédiction de celle-ci, afin d'avoir une idée des résultats attendus. Il est donc nécessaire de connaître les différentes méthodes de prédictions de la conductivité hydraulique appliquées dans la littérature.

2.9.3 Prédications de la conductivité hydraulique

Plus de 45 modèles de prédiction de la conductivité hydraulique ont été développées par différents auteurs des années 1800 aux années 2000 (Bussière & Guittonny, 2020; Chapuis, 2012). Les modèles les plus utilisés sont présentés au Tableau 1.

Les modèles de prédiction de k_{sat} les plus fréquemment utilisés dans la phase préliminaire d'un essai comprennent le modèle de (KC) (Aubertin et al., 2003), le modèle de (KCM) (Aachib et al., 2002), le modèle de Shepherd (1989) et le modèle proposé par Taylor (1948), Budhu (2011). Les équations de ces modèles sont présentées au Tableau 1 (Kalonji, 2014).

Tableau 1 Équations de prédiction de k_{sat} (Kalonji, 2014)

Équations	Forme mathématiques
Modèle de KC (Chapuis et Aubertin, 2003)	$k_{sat} \text{ (cm/s)} = \frac{C g}{\mu_w \rho_w S_s^2 D_R^2} \frac{e^3}{(1+e)}$
Modèle de KCM (Mbonimpa et al., 2003)	$k_{sat} \text{ (cm/s)} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+X}}{(1+e)} C_U^{\frac{1}{3}} D_{10}^2$
Shepherd (1989) tiré de Peregoedova (2012)	$k_{sat} \text{ (cm/s)} = 3,53 \times 10^{-2} \times D_{50}^{1,5}$
Taylor (1948) et Budhu (2011) tiré de Peregoedova (2012)	$k_{sat} \text{ (cm/s)} = C_1 \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^3}{(1+e)} D_{50}^{1,5}$

Les paramètres utilisés dans la prédiction de k_{sat} sont :

μ_w : La viscosité dynamique de l'eau (10^{-3} Pa·sec à 20°C)

C : La constante utilisée pour le modèle de KC

g : L'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$)

ρ_w : La masse volumique de l'eau (998 kg/m^3 à 20°C)

S_s : La surface spécifique des grains en (m^2/kg)

D_R : La densité relative des grains solides ($D_R = \rho_s/\rho_w$)

C_G : La constante du modèle de KMC qui équivaut à 0,1

γ_w : Le poids spécifique de l'eau (998 kN/m^3)

e : L'indice des vides du matériaux

X : Le paramètre de tortuosité dans le modèle KCM (X=2)

D_{50} : Diamètre des grains correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique (cm)

D_{10} : Diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique (cm)

C_u : Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{10} / D_{60}$)

C_1 : Constante déterminée expérimentalement.

L'utilisation de ces modèles de prédiction de k_{sat} dépend des informations disponibles sur les propriétés géotechniques du sol. Par exemple, l'auteur Shepherd (1989) propose un modèle uniquement basé sur (D_{50}).

Ce modèle peut être utilisé pour faire une prédiction rapide de k_{sat} avec seulement un seul paramètre, mais ce modèle de prédiction ne peut être utilisé que pour les sables et les matériaux grossiers (Chapuis, 2012; Peregoedova, 2012) puisque la granulométrie n'est pas le seul paramètre qui définit les sols cohérents.

Le modèle proposé par Chapuis et Aubertin (2003) est applicable à tous types de sols, cependant, l'utilisation de ce modèle nécessite plusieurs paramètres pour la prédiction de la k_{sat} (Aubertin et al., 2003; Chapuis, 2012).

3. CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La méthodologie générale du projet de recherche est présentée, à la Figure 13 qui montre de manière détaillée les étapes du projet dans un organigramme.

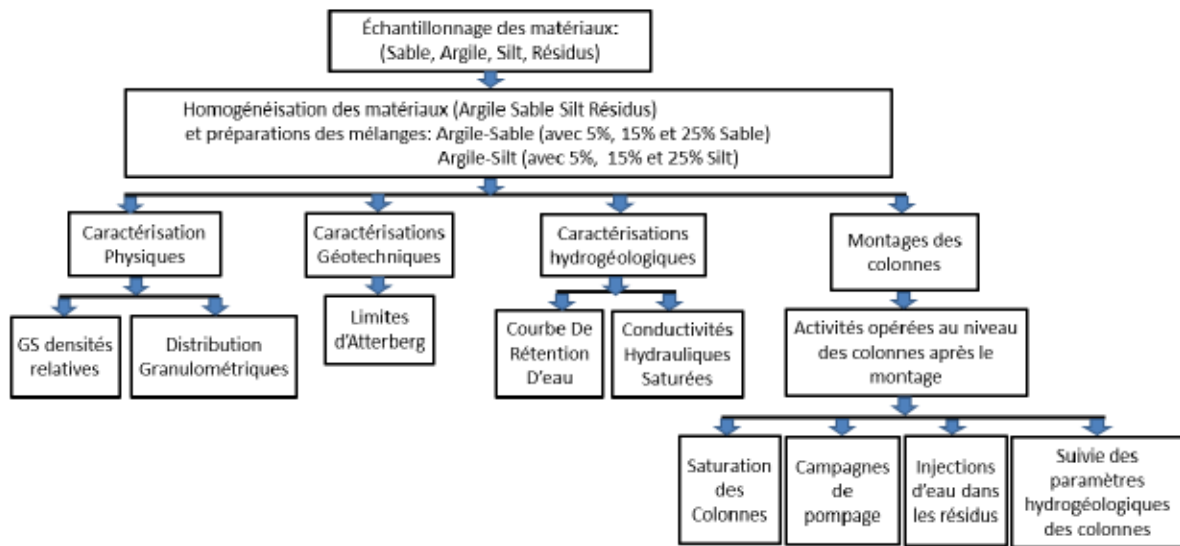


Figure 13 Méthodologie générale du projet de recherche

Les étapes du projet de recherche comprennent :

- L'échantillonnage des matériaux : qui consistait à prélever les matériaux de base tels que le sable, le silt et les résidus miniers. L'échantillonnage de ces matériaux a été réalisé de manière aléatoire sur le site Quémont 2 de la fonderie Horne;
- L'homogénéisation et les préparations des mélanges : cette étape se caractérise par le mélange et l'uniformisation des échantillons prélevés en utilisant la méthode de quartage afin d'obtenir des échantillons homogènes; ensuite les mélanges ont été préparés selon les proportions préétablies de sable et de silt ;
- La caractérisation physique des échantillons, afin de déterminer leurs densités relatives des grains solides et leurs distributions granulométriques ;

- Les caractérisations géotechniques, et plus particulièrement, la détermination des limites d'Atterberg;
- Les caractérisations hydrogéologiques afin de déterminer les courbes de rétention d'eau, et les conductivités hydrauliques saturées des matériaux à base d'argile ;
- Le montage des colonnes expérimentales et le suivi de leur saturation et de leur drainage.

Dans ce qui suit, les travaux mis en œuvre, afin de déterminer les caractéristiques physiques, ainsi que les caractéristiques hydro géotechniques des matériaux à base d'argiles seront présentées.

3.1 Caractérisation physique

3.1.1 Préparation des échantillons

Les échantillons d'argile, de sable et de silt ont été prélevés sur le site Quémont 2. Ces derniers ont été pesés, puis séchés à l'étude au laboratoire de l'URSTM à 60 degrés Celsius, afin de déterminer leurs teneurs en eau massique initiale. Ensuite, les échantillons ont été homogénéisés en utilisant la méthode de quartage. Cette méthode consistait à mélanger des matériaux préalablement étalés sur du papier « Kraft », en se servant des quatre coins de ce dernier. En effet, lorsqu'on tire de manière diagonale le papier « Kraft » d'un bout à l'autre, un mouvement rotatif est exercé sur les échantillons de sorte qu'ils roulent sur eux-mêmes, permettant ainsi de les homogénéiser (ASTM C702, méthode B). En effectuant ces mouvements diagonaux quarante fois, les quatre parties de l'échantillon sont ainsi mélangées, permettant ainsi d'obtenir un spécimen homogène.

3.1.2 Densité relative des grains

La densité relative des grains solides est un paramètre physique qui se définit comme étant le ratio de la masse volumique des grains solides par rapport à la masse volumique de l'eau. Ce paramètre a été obtenu en utilisant le Pycnomètre à hélium (Quantachrome Ultrapyc 1200e) au laboratoire de l'URSTM selon la méthode ASTM D5550-00.

Cet instrument met en avant l'utilisation de l'hélium, qui est un gaz parfait pouvant s'infiltrer au sein des petits pores des matériaux secs. Le Pycnomètre à hélium permet ainsi d'obtenir le volume des grains, en mesurant la chute de pression qui se produit après qu'un gaz ayant une pression connue (hélium) soit diffusé dans la chambre contenant le matériel solide à tester. Cet équipement utilise donc, la relation entre la chute de pression et le volume de la chambre, afin de déterminer le volume des échantillons analysés (ACD-o Soil, 2006).

Grâce à des formules qui sont paramétrées dans le système de cet appareil, la densité relative des grains est obtenue, en utilisant les paramètres tels que la masse, le volume de l'échantillon, et la masse volumique de l'eau distillée, pour des matériaux ne contenant pas de matière soluble dans l'eau (ASTM D5550-00) (ACD-o Soil, 2006; Robitaille & Tremblay, 1997).

Les valeurs de G_s obtenues se situent entre 2,63 et 2,81 respectivement pour l'argile et les résidus miniers (voir Tableau 2).

Tableau 2 Densité relative des grains solides des matériaux de base

Matériaux utilisés	Argile	Sable limoneux	Sable fin	Résidus miniers
G_s	2,63	2,69	2,69	2,81

3.1.3 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg représentent les différentes teneurs en eau, permettant de délimiter l'état solide, l'état semi-solide, l'état plastique et l'état liquide, qui correspondent aux quatre états de consistance d'un sol. Les limites d'Atterberg comprennent les limites de liquidité (w_L), les limites de plasticité (w_P) et les limites de retrait (w_s).

L'essai pour déterminer la limite de liquidité (w_L) avec le pénétromètre à cône suédois est effectué selon la norme (CAN/2501-092). L'essai réalisé avec le pénétromètre à cône suédois pour déterminer la limite de liquidité consistait à positionner l'échantillon étudié

et homogénéisé à une certaine teneur en eau dans le bocal de l'appareil et à laisser tomber par gravité durant 5 secondes le cône de 60 grammes (g) à l'intérieur de l'échantillon.

Le cône était préalablement positionné à la surface de l'échantillon, de sorte à pouvoir mesurer la hauteur de pénétration de ce dernier dans l'échantillon lorsqu'on le laisse tomber. Puis, l'échantillon est pesé et mis à l'étuve pour déterminer sa teneur en eau massique afin d'avoir un point représentant la teneur en eau massique en fonction de la hauteur de pénétration du cône dans l'échantillon.

Ainsi, durant l'essai, la teneur en eau de l'échantillon était augmentée par ajout d'eau, puis il était homogénéisé avant de placer une portion représentative de ce dernier dans le bocal du pénétromètre à cône suédois dans l'optique d'avoir plusieurs points de teneurs en eau massique en fonction des hauteurs de pénétration.

À l'issue de l'essai on obtient plusieurs points qui constitueront une droite correspondant aux teneurs en eau massique des matériaux en fonction des hauteurs de pénétration en millimètre du cône du pénétromètre (de 60 g formant un angle de 60 degrés) dans ces derniers. Ainsi la limite de liquidité (w_L) est obtenue par le point sur cette droite correspondant à une pénétration de 10 mm dans les matériaux étudiés.

L'appareil de Casagrande est également utilisé pour déterminer la limite de liquidité. L'essai est réalisé selon la norme ASTM D4318 (ASTM, 2005). L'essai, réalisé avec l'appareil de Casagrande pour déterminer la limite de liquidité consiste à mettre l'échantillon étudié homogénéisé à une certaine teneur en eau dans le bocal de l'appareil et à séparer l'échantillon dans la coupelle en deux avec l'outil à rainurer de cet appareil. Ensuite, la manivelle est actionnée de sorte que la coupelle chute afin de taper le support de l'appareil de Casagrande ce qui constitue un coup. Le nombre de coups permettant la fermeture de la rainure sur 1 centimètre est noté et la teneur en eau massique de l'échantillon est déterminée.

Ainsi, durant l'essai, la teneur en eau de l'échantillon est augmentée par ajout d'eau puis homogénéisé, avant de placer une portion représentative de ce dernier dans la coupelle de

l'appareil de Casagrande, afin d'avoir plusieurs teneurs en eau massique en fonction du nombre de coups.

Ces points qui constitueront la courbe (droite) de la teneur en eau massique en fonction du nombre de coups effectué avec cet appareil, sont représentés sur une échelle logarithmique. Ainsi, la limite de liquidité est obtenue par le point sur cette droite correspondant à 25 coups effectués (ASTM, 2005).

La limite de plasticité a été déterminé selon la norme (ASTM, 2005). Dans cette évaluation, on estime que le sol étudié a atteint sa limite de liquidité lorsque des rouleaux d'échantillons de ce dernier, qui sont effectués à la main sur une surface solide et plane, se brisent en segment variant de 3 à 10 mm (ASTM, 2005).

Les résultats des essais réalisés afin de déterminer les limites de liquidité et de plasticité ainsi que l'indice de plasticité des argiles maigres sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 Limites d'Atterberg du matériau de base (Argile maigre)

% de Matériaux	Limite de liquidité wL (%)	Limite de plasticité wP (%)	Indice de plasticité IP (%)
100% Argile maigre	29,08	19,00	10,08

Les valeurs des limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité de l'argile maigre correspondent à 29,08%, 19% et 10,08%, respectivement.

Ces matériaux caractérisés ont été utilisés pour la préparation des mélanges des argiles amendées. Ainsi, six mélanges ont été préparé avec des proportions de 5%, 15% et 25% de sable limoneux pour 95 %, 85% et 75% d'argile maigre ainsi que 5% ,15% et 25% de sable fin pour 95 %, 85% et 75% d'argile maigre (voir Tableau 4).

Tableau 4 Pourcentages des matériaux de base dans les mélanges préparés en laboratoire

	Mél.1	Mél.2	Mél.3	Mél.4	Mél.5	Mél.6	Mél.7
Argile maigre (%)	100	85	85	95	75	95	75
Sable Limoneux (%)	0	0	15	0	0	5	25
Sable fin (%)	0	15	0	5	25	0	0

Ces mélanges ont été utilisés afin de simuler les recouvrements de type faible conductivité hydraulique saturée. Les argiles amendées ont fait également l'objet de caractérisations détaillées et les résultats seront présentés dans le chapitre 4.

3.1.4 Distribution granulométrique

La granulométrie est une caractéristique physique des matériaux permettant de déterminer la taille des grains d'un sol ou d'un matériel afin de visualiser sa distribution respective par ordre de grandeur des grains mesurés.

Cette granulométrie a été déterminée en utilisant le granulomètre laser. Le granulomètre laser mesure la distribution granulométrique des échantillons ayant une taille de grains comprise entre 0 et 3500 microns en utilisant la technique de diffraction laser.

Cette technique consiste à mesurer l'intensité de la lumière résultant d'un faisceau laser passant à travers des particules dispersées par un agitateur.

Cette intensité mesurée est analysée à travers le logiciel Mastersizer de Malvern afin de calculer la taille des grains correspondante pour ainsi produire une courbe granulométrique représentant le pourcentage passant cumulé en fonction de la taille des grains en microns ou en millimètres ([Mastersizer 3000 | World's Leading Particle Size Analyzer | Malvern Panalytical](#)).

Les résultats de ces analyses granulométriques sont présentés au Tableau 5 et à la Figure 14.

Tableau 5 Analyses et classifications granulométriques des matériaux de base

Paramètres	Argile	Sable limoneux	Sable fin	Résidus
D₁₀ (µm)	1,00	28,70	72,70	1,90
D₃₀ (µm)	2,4	76,00	140,00	5,90
D₆₀ (µm)	6,42	133,00	224,00	16
D₉₀ (µm)	18,00	237,00	391,00	60,80
C_u	6,44	4,63	3,08	8,47
C_c	0,90	1,51	1,20	1,16
% Fraction argileuse (< 2 µm)	25,00	2,00	2,00	11,00
% Silt (75 µm - 2 µm)	75,00	28,00	8,00	81,00
% Sable fin (425 µm - 75 µm)	0,00	70,00	83,00	8,00
% Sable moyen (425 µm-2 mm)	0,00	0,00	7,00	0,00
Classification (ASTMD2487)	Argile maigre (CL)	Sable mal gradué (SP)	Sable mal gradué (SP)	Sable Silteux (SW-SM)

Les classifications des matériaux de base selon la norme ASTM D2487 ont permis d'identifier l'argile utilisée comme étant une argile maigre, le sable comme du sable mal gradué avec limons et des sables fins.

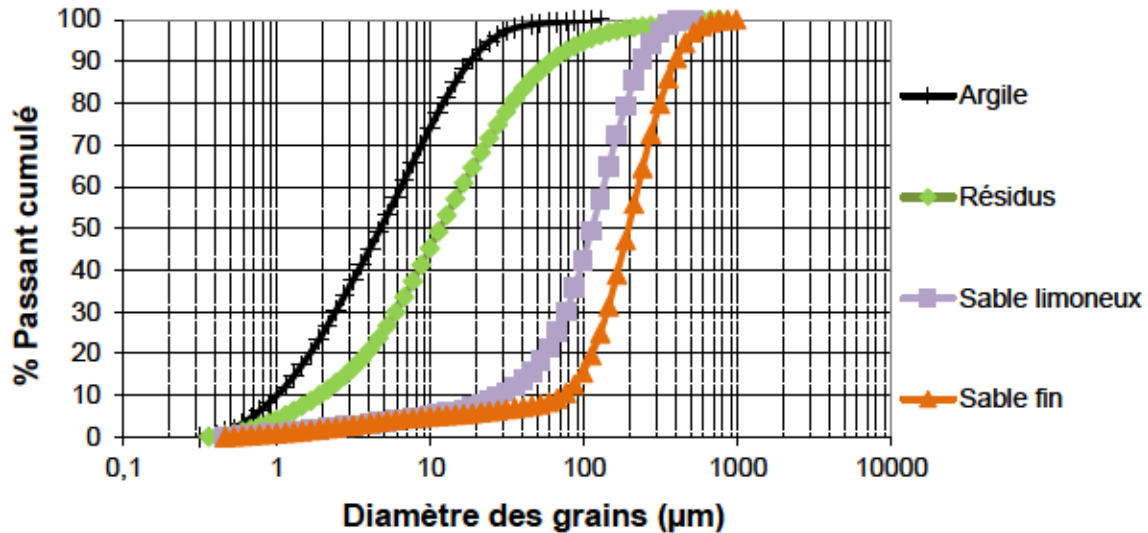


Figure 14 Courbes granulométriques des matériaux de base

3.2 Caractérisation hydro-géotechnique

3.2.1 Conductivité hydraulique saturée

Les conductivités hydrauliques saturées ont été mesurées à l'aide du perméamètre à paroi flexible à charge variable pour nos matériaux à base d'argile maigre de l'Abitibi et à l'aide du perméamètre à paroi rigide à charge constante pour les matériaux plus grossiers tel que le sable limoneux et le sable fin.

L'essai de perméabilité à charge variable a été réalisé à l'aide du perméamètre à parois flexibles selon la norme ASTM 5084-03 (Soil & Rock, 2010). Afin de réaliser l'essai de perméabilité à charge variable, l'échantillon est compacté à l'intérieur d'un moule ensuite placé dans une membrane flexible avant de le fixer à l'intérieur du perméamètre. La membrane qui empêche l'eau de la cellule de rentrer en contact avec l'échantillon prend la forme de ce dernier grâce à la pression appliquée à l'intérieur de la cellule (pression de confinement).

L'échantillon est ensuite saturé en utilisant de l'eau déionisée et désaérée circulant sous pression. La burette graduée du perméamètre est connectée au port d'entrée d'eau de l'échantillon vers le port de sortie d'eau de ce dernier. Par ailleurs, une pression de confinement 1,5 fois supérieure à la pression de saturation (pression appliquée sur l'échantillon) est considérée, afin de saturer l'échantillon. La Figure 15 illustre un essai de conductivité hydraulique effectué sur un échantillon à base d'argile Abitibienne au laboratoire de l'URSTM à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible.



Figure 15 Perméamètre à parois flexibles

Lorsque l'échantillon est saturé, on connecte la burette graduée, au port d'entrée et de sortie d'eau de l'échantillon, on mesure l'intervalle de temps ($t_2 - t_1$) entre deux mesures de niveau d'eau dans les burettes, les pertes de charge variables h_1 et h_2 aux temps t_1 et t_2 .

Connaissant l'aire (A) à travers laquelle l'eau s'écoule dans l'échantillon, ainsi que sa longueur (L) le calcul du coefficient de perméabilité (k) peut être fait en utilisant l'équation

suivante qui est dérivée de la loi de Darcy (Robitaille & Tremblay, 1997; Soil & Rock, 2010).

$$k = \frac{aL}{A(t_2-t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Éq. 36}$$

k: Le coefficient de perméabilité (m/s ou cm/s)

a : L'aire du tube d'entrée (m² ou cm²)

L : La longueur de l'échantillon (m ou cm)

A : La surface de la section de l'échantillon (m² ou cm²)

h₁ = La charge hydraulique au temps t₁ (m ou cm)

h₂ = La charge hydraulique au temps t₂ (m ou cm)

t₁ = Le temps auquel la charge hydraulique à la hauteur h₁ (s)

t₂ = Le temps auquel la charge hydraulique diminue jusqu'à atteindre la hauteur h₂ (s)

Il est à noter que les échantillons argileux se collaient au moule lors du montage de ces derniers, et pour remédier à ce problème, un film de plastic était préalablement installé à l'intérieur du moule, afin que l'échantillon évite de se fendre en deux lors de la mise en place de ce dernier dans la membrane flexible de l'équipement.

L'essai de perméabilité à charge constante a été réalisé avec le perméamètre à paroi rigide, dans lequel, les échantillons étudiés ont été compactés directement dans le moule du perméamètre (à des teneurs en eau optimale) saturé puis soumis à une perte de charge constante (Δh) afin d'obtenir un écoulement d'eau stable à travers l'échantillon.



Figure 16 Perméamètre à parois rigides

Ensuite, le débit d'eau (q) sortant de l'échantillon est mesuré en tenant compte du temps requis (t) pour recueillir un volume (V) d'eau dans une éprouvette. Connaissant l'aire (A) à travers laquelle l'eau s'écoule dans l'échantillon, ainsi que la longueur (L) de ce dernier grâce aux mesures effectuées pendant le montage, le coefficient de perméabilité (k_{sat}) est calculé en utilisant l'équation suivante (ASTM, 2007; Robitaille & Tremblay, 1997) :

$$k = \frac{QL}{Ath} \quad \text{Éq. 37}$$

Avec :

k : Le coefficient de perméabilité (m/s ou cm/s)

Q : La quantité d'eaux évacuées du système (m^3)

t : Le temps total auxquels l'eau est évacuée du système (s)

L : La distance entre les manomètres (m ou cm)

A : La section transversale du perméamètre (l'aire) (m^2 ou cm^2)

h : La différence de hauteurs d'eau des manomètres (m ou cm) (ASTMD2434, 1997).

Les résultats des mesures sont présentés au Tableau 6. Ainsi, les valeurs obtenues correspondent à $2,13 \times 10^{-10}$, $6,75 \times 10^{-06}$ et $7,07 \times 10^{-05}$ m/s, respectivement, pour l'argile, le sable limoneux et le sable fin.

Tableau 6 k_{sat} mesurée des matériaux de base

Matériaux	k_{sat} mesurée (m/s)
Argile	$2,13 \times 10^{-10}$
Sable avec des limons	$6,75 \times 10^{-06}$
Sable fin	$7,07 \times 10^{-05}$

3.2.2 Courbe de rétention en eau

Les courbes de rétention d'eau ont été déterminées à l'aide de l'extracteur de plaque de pression pour nos matériaux à base d'argile (ASTM, 2016) et les cellules Tempe pour les sable limoneux et fins (ASTM, 2016).

Il est important de mentionner que les CRE des différents matériaux de base ont été estimées à l'aide du modèle de Kovács modifié (Aubertin et al., 2003, Mbonimpa et al., 2006). Ces prédictions des CRE ont été utilisées dans la détermination des AEV en utilisant la méthode des tangentes. Les AEV ont été utilisées pour sélectionner les succions qui seront appliquées dans les essais expérimentaux.

L'extracteur de plaque de pression est un équipement contenant une chambre dans laquelle les échantillons étudiés sont placés, puis soumis à des pressions (avec l'azote liquide). La pression est contrôlée par une valve équipée d'un manomètre. L'essai consiste donc, à placer un échantillon (homogénéisé à saturation) dans douze anneaux cylindriques, puis sur deux membranes (saturée avec de l'eau déionisée et désaérée) qui sont placées à la base des échantillons à l'intérieur de la cellule de l'extracteur. Les échantillons sont ensuite enfermés dans la plaque de pression puis soumis à des succions afin que l'eau puisse s'écouler de l'échantillon à travers un orifice situé en dessous de l'extracteur. Par ailleurs, cet orifice est en contact avec la pression atmosphérique.

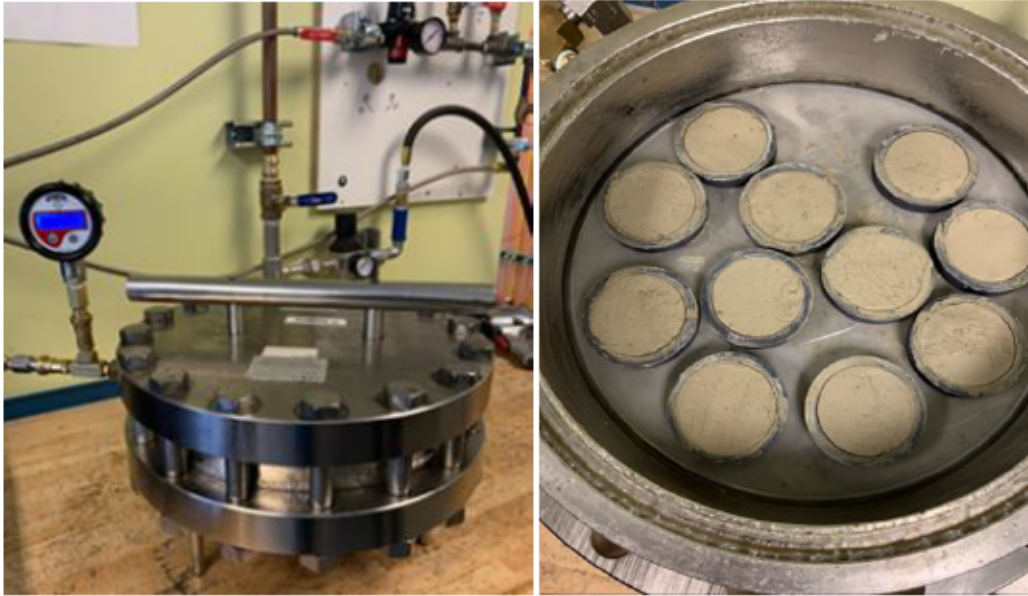


Figure 17 Extracteur de plaque de pression

Six paliers de pression, encadrant l'AEV estimée de l'échantillon à l'étude, sont appliqués progressivement durant l'essai. Ainsi, à chaque palier de pression, deux anneaux (paire d'échantillons) sont retirés puis placés dans l'étuve afin de déterminer la teneur en eau massique correspondant à la succion appliquée. Cette teneur en eau gravimétrique (w) est convertie en teneur en eau volumique (θ) à l'aide de l'équation 38 ci-dessous qui prend en compte la masse volumique de l'eau (ρ_w) et la masse volumique sèche (ρ_d) des échantillons à l'étude afin d'obtenir la courbe de rétention d'eau (ASTM, 2016).

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} w \quad \text{Éq. 38}$$

θ : Teneur en eau volumique,

ρ_d : Masse volumique sèche des échantillons à l'étude,

ρ_w : Masse volumique de l'eau,

w : Teneur en eau gravimétrique.

Concernant la cellule Tempe, c'est un appareillage qui ne peut contenir qu'un seul échantillon. Cependant, l'essai est dupliqué dans deux cellules Tempe différentes. L'essai consiste à positionner l'échantillon homogénéisé avec sa teneur en eau à saturation dans une cellule posée sur une pierre poreuse (saturée avec de l'eau déionisée 24 heures avant le montage) et qui est placée à la base de la cellule.

L'échantillon est ensuite enfermé dans la cellule puis soumis à des succions afin que l'eau puisse s'écouler de ce dernier à travers l'orifice en dessous de la cellule Tempe. Des paliers de pression encadrant l'AEV estimé de l'échantillon sont appliqués progressivement. À chaque palier de pression, la cellule Tempe est pesée afin de déterminer la teneur en eau massique après que l'eau a été extraite de l'échantillon. Cette teneur en eau massique est par la suite convertie en teneur en eau volumique en utilisant l'équation 38 ci-dessus.

Les teneurs en eau volumiques et les succions sont utilisées, afin d'obtenir la courbe de rétention d'eau (ASTM, 2016).



Figure 18 Cellules Tempes

Les CRE mesurées ont été utilisées pour déterminer l'AEV des matériaux étudiés, en utilisant la méthode des tangentes (Fredlund & Xing, 1994). Les valeurs des pressions d'entrée d'air AEV (kPa) des matériaux déterminés à partir des CRE mesurées sont présentées au Tableau 7.

Les valeurs obtenues, sont respectivement de 2 kPa pour le sable fin, 60 kPa pour le sable limoneux, 150 kPa pour l'argile maigre et 8 kPa pour les résidus miniers.

Tableau 7 AEV des matériaux

Matériaux	Pression d'entrée d'air AEV (kPa)
Argile maigre	150
Sable fin	2
Sable limoneux	60
Résidus	8

3.3 Méthodes d'essais en colonne des recouvrements à base d'argile de l'Abitibi

Dans cette section nous présenterons les configurations, les paramètres de mise en place, et le processus expérimental adopté lors des essais à l'aide des colonnes expérimentales en laboratoire.

3.3.1 Configurations

Les recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée sont simulés à l'aide de colonnes expérimentales instrumentées. Ces recouvrements ont pour objectif de limiter les flux d'eau vers les résidus miniers réactifs.

Il est important de mentionner que dans toutes les configurations testées, les résidus miniers réactifs sont placés à la base de chaque colonne. Ainsi, neuf colonnes illustrées à la Figure 19 ont été utilisées (voir Figure 20).



Figure 19 Colonnes expérimentales

- La première colonne est une colonne simulant un recouvrement, constitué uniquement d'argile ;
- La deuxième, la cinquième et la sixième colonne simulent des mélanges d'argile amendée avec du sable limoneux. Les proportions respectives correspondent à 15%, 5% et 25% de sable fin.
- La troisième, la septième et la huitième colonne simulent des mélanges d'argile amendés avec du sable fin à des proportions respectives de 15%, 5% et 25% de sable limoneux.
- La quatrième colonne simule une couche constituée de sable limoneux emprisonnée entre deux couches d'argiles (double couche d'argile).
- La neuvième colonne est la colonne témoin où les résidus miniers ne sont pas couverts. Cette colonne est utilisée pour simuler leurs comportements en absence de recouvrement.

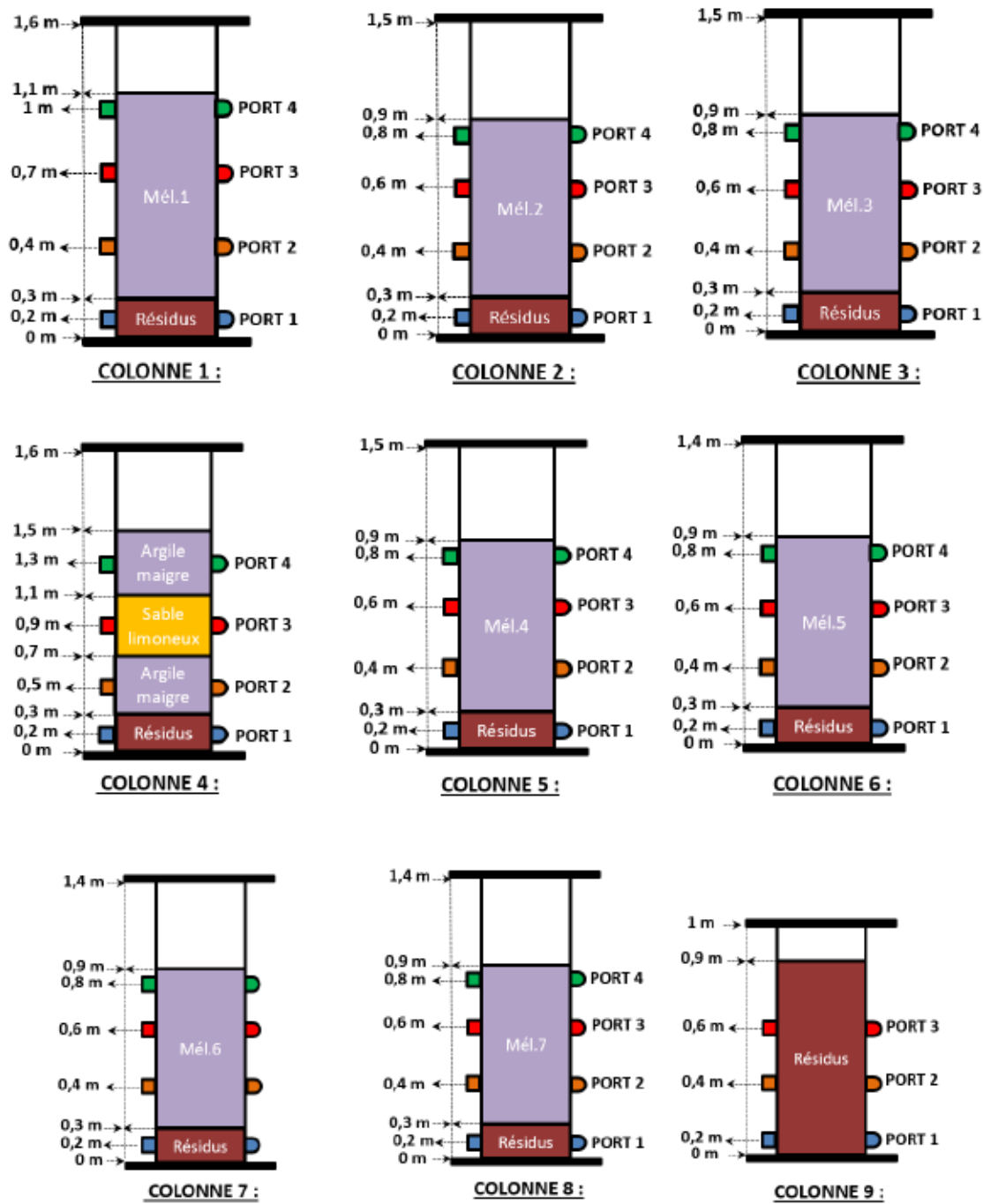


Figure 20 Configurations des colonnes expérimentales

3.3.2 Mise en place

Lors de la mise en place de chaque colonne, une pierre poreuse a été placée à sa base. Avant la mise en place des matériaux dans les colonnes, les échantillons à tester dans les

recouvrements ont été l'homogénéisés et les masses de matériaux à mettre dans les colonnes par tranche de 10 cm ont été évaluées, afin d'atteindre la porosité visée. Les paramètres de mise en place sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 Paramètres de mise en place des colonnes expérimentales

Colonnes	Matériaux	Masse (g)	W%	Diamètre des Colonnes (cm)	Épaisseur des Matériaux (cm)	n visée	n finale
Colonne 1	Mél.1	24220,6	16,28	14	80	0,48	0,36
	Résidus	9413,5	30,29	14	30	0,40	0,44
Colonne 2	Mél.2	17917,6	19,63	14	60	0,43	0,49
	Résidus	8960	30,29	14	30	0,40	0,47
Colonne 3	Mél.3	18601,28	20,24	14	60	0,39	0,36
	Résidus	9295,9	30,29	14	30	0,40	0,45
Colonne 4	Mél.1 zone supérieure	12072,8	16,28	14	40	0,48	0,36
	Sable	6875,2	2,67	14	40	0,46	0,59
	Mél.1 zone inférieure	12131,6	16,28	14	40	0,48	0,36
	Résidus	9201,3	30,29	14	30	0,40	0,45
Colonne 5	Mél.4	16588	22,04	14	60	0,41	0,46
	Résidus	8620,1	30,29	14	30	0,40	0,49
Colonne 6	Mél.5	19238,2	17,50	14	60	0,41	0,33
	Résidus	9338,1	30,29	14	30	0,40	0,45
Colonne 7	Mél.6	18636,6	21,95	14	60	0,41	0,37
	Résidus	9667,5	26,82	14	30	0,40	0,43
Colonne 8	Mél.7	19028,5	16,81	14	60	0,41	0,33
	Résidus	9602,8	30,29	14	30	0,40	0,43
Colonne 9	Résidus	26336	30,29	14	90	0,40	0,52

La colonne composée de matériaux non amendés à une épaisseur de matériaux de 80 centimètres, les autres colonnes contenant des recouvrements à base d'argile ont des

épaisseurs de matériaux de 60 cm, et la colonne contenant les couvertures multicouches a des épaisseurs de matériaux de 40 cm, afin d'expérimenter à l'échelle de laboratoire les configurations déjà testées à l'échelle des cellules de terrain sur le site de Quémont 2.

Cependant à défaut de choisir 30 cm comme épaisseur des résidus de la colonne témoin, une épaisseur de 90 cm a été mise en place dans cette colonne afin de représenter les résidus de la cellule témoin de terrain qui avait une épaisseur similaire.

On remarque aussi que la porosité de mise en place finale est inférieure à la porosité visée pour les matériaux à base d'argile en raison du compactage qui a été réalisé durant le montage. Quant aux résidus miniers, leurs porosités finales sont plus élevées que celles des valeurs cibles en raison de leur teneur en eau.

3.3.3 Expérimentation

Avant le début des essais, toutes les colonnes à l'étude ont été saturées par le bas, pendant un mois, avant de faire le premier rinçage (en utilisant des bonbonnes d'eau positionnée au-dessus des recouvrements). Après cette saturation, des succions ont été appliquées en bas des colonnes en utilisant des pompes péristaltiques afin de faciliter le drainage des colonnes. Ainsi, des succions ont été appliquées pendant un mois au niveau des colonnes 2, 4, 5, 6, 7 et 8. Malgré ces succions, l'eau des colonnes n'a pas été drainée.

Dans le but d'évaluer la qualité des lixiviats et des possibilités de formation du DMA, des orifices ont été perforés à l'interface recouvrement-résidus miniers. Ces orifices ont été utilisées pour l'injection d'eau dans les résidus des colonnes expérimentales.

3.4 Calibrage des sondes

Les courbes de calibrage ont été réalisées pour les matériaux de base et les mélanges d'argile amendée.

Les courbes obtenues sont de type $y = ax$. Les valeurs a et les coefficients de détermination R^2 sont présentés au Tableau 9. Comme le montre le Tableau 9, les coefficients R^2 obtenus sont très élevés et se situent entre 0,9497 et 0,9916.

Ces courbes de calibration vont permettre de convertir le signal mesuré par les sondes de type 5 TM en teneurs en eau volumiques.

Tableau 9 Équation de conversion des signaux et leurs coefficients de corrélation

	Équation	R ²
Mélange 1	$Y = 0,9625X$	0,9497
Mélange 2	$Y = 0,7231X$	0,9831
Mélange 3	$Y = 0,9785X$	0,9785
Mélange 4	$Y = 0,8975X$	0,9864
Mélange 5	$Y = 0,9974X$	0,9896
Mélange 6	$Y = 0,8538X$	0,9823
Mélange 7	$Y = 0,6766X$	0,9626
Sable fin	$Y = 0,5991X$	0,9822
Résidus miniers	$Y = 1,0052X$	0,9916

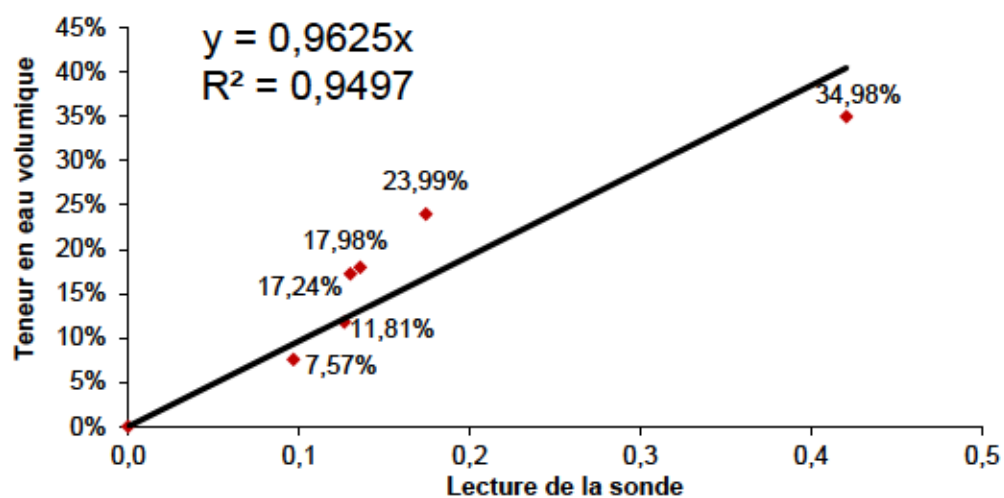


Figure 21 Courbe de calibrage du mélange 1 (Argile maigre)

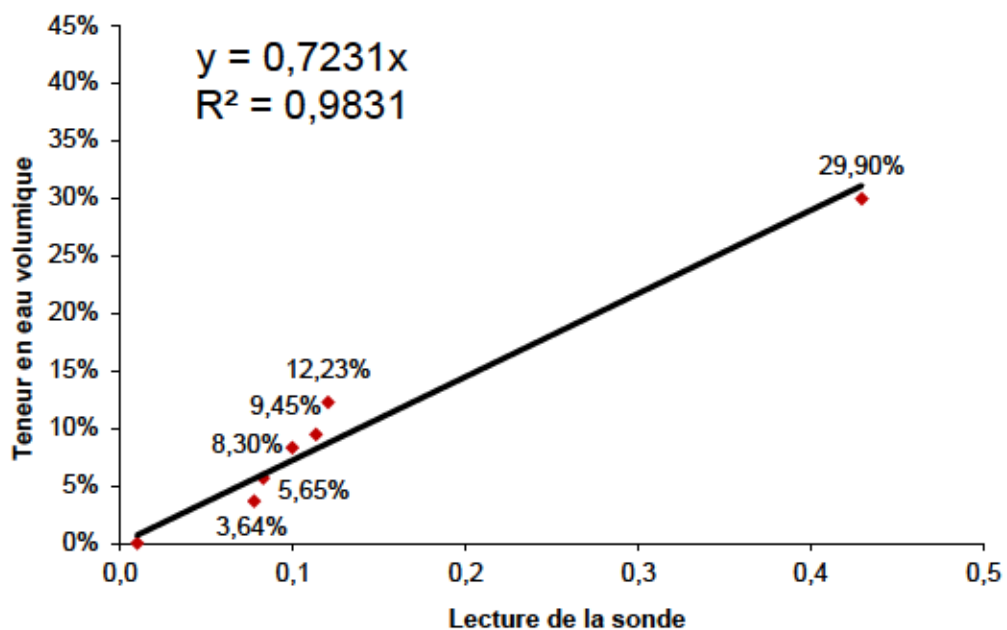


Figure 22 Courbe de calibrage du mélange 2 (Argile-15%de sable fin)

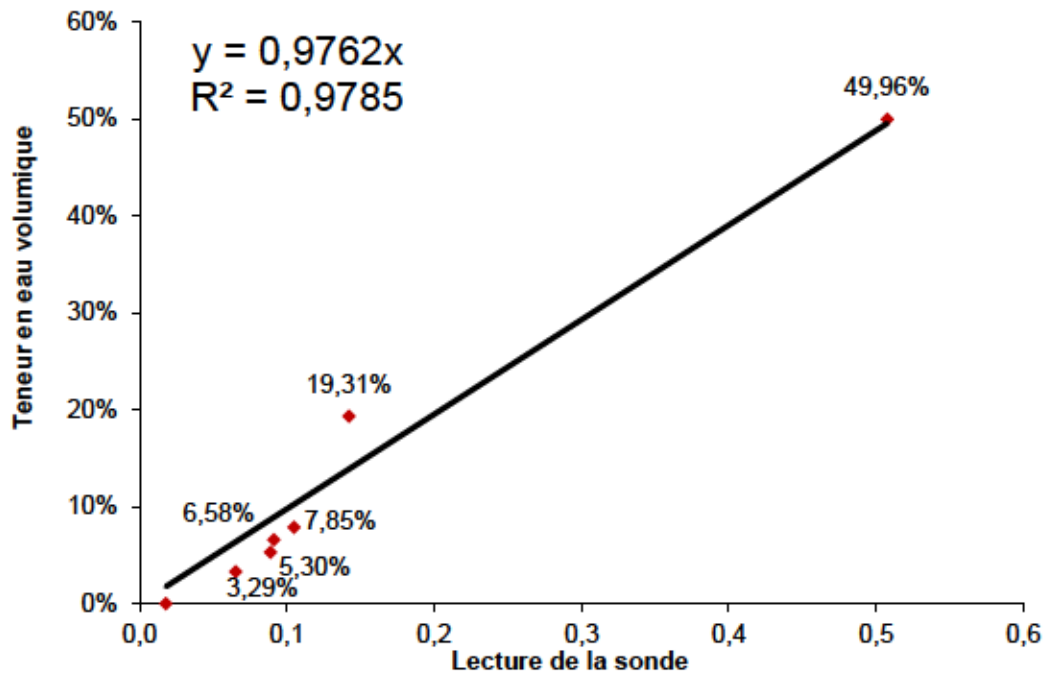


Figure 23 Courbe de calibrage du mélange 3 (Argile-15%de sable limoneux)

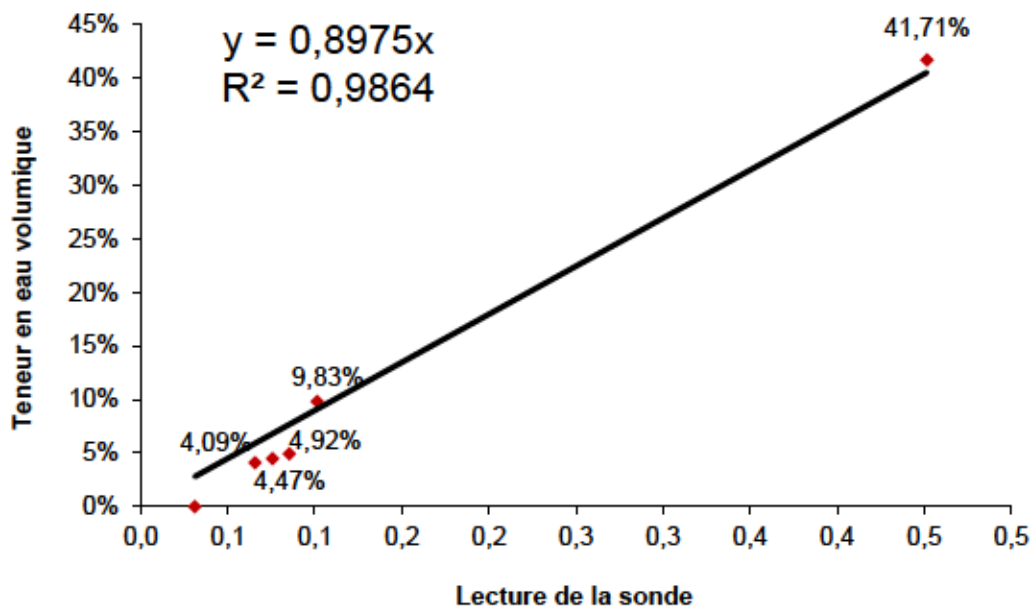


Figure 24 Courbe de calibrage du mélange 4 (Argile-5%de sable fin)

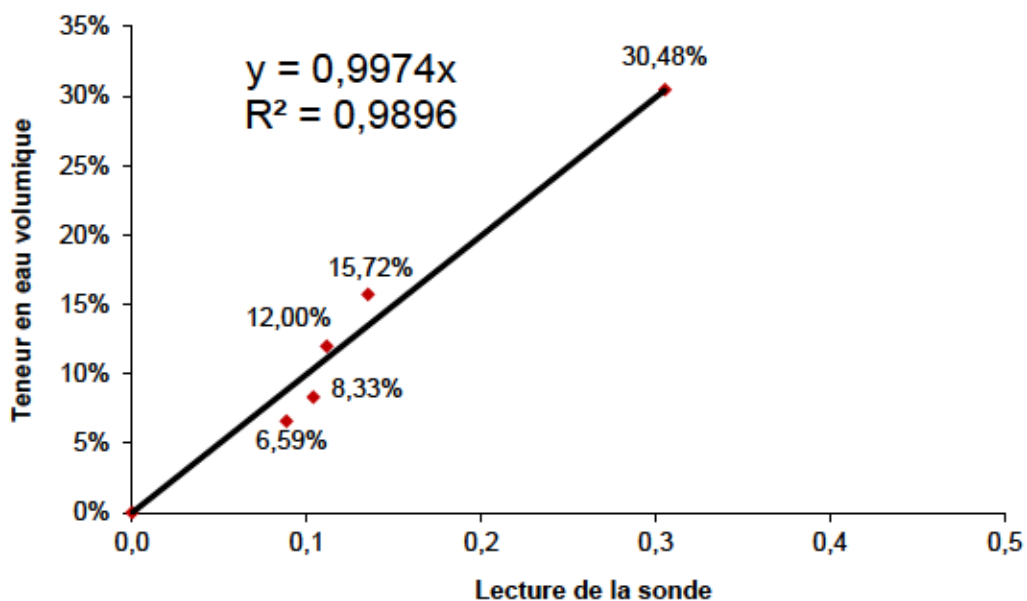


Figure 25 Courbe de calibrage du mélange 5 (Argile-25%de sable fin)

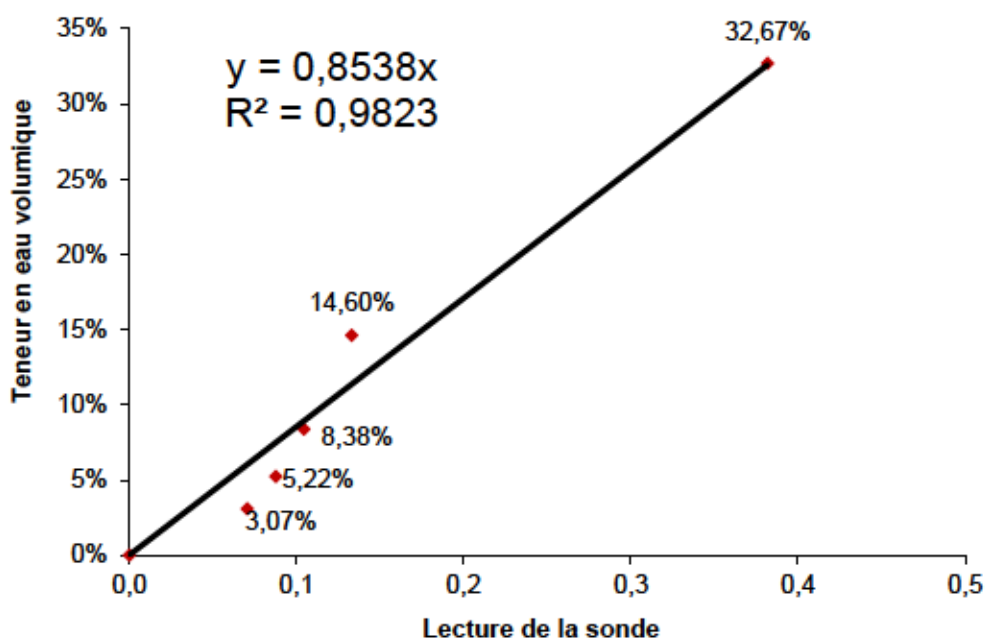


Figure 26 Courbe de calibrage du mélange 6 (Argile-5%de sable limoneux)

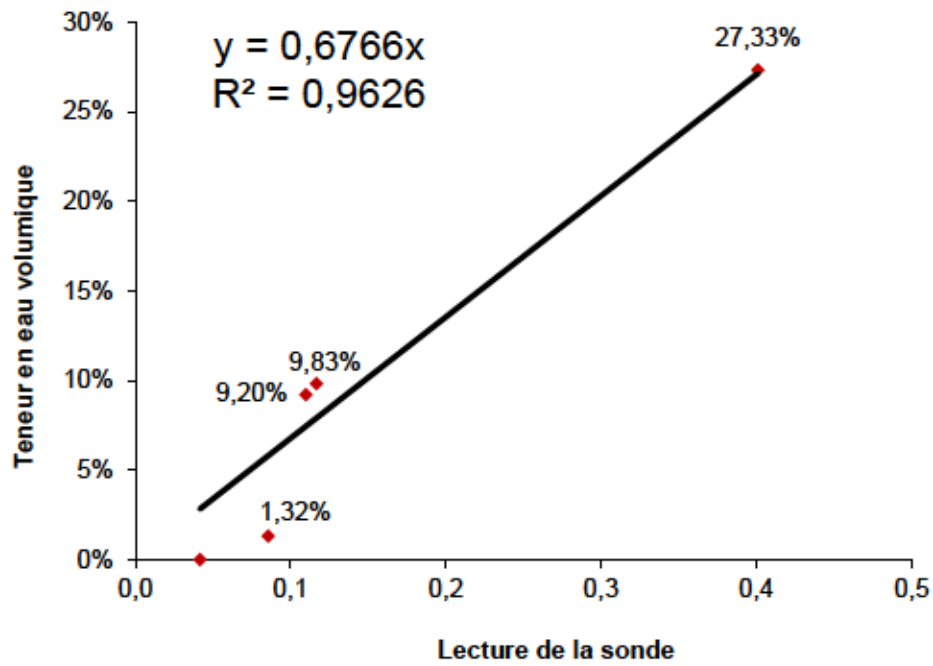


Figure 27 Courbe de calibrage du mélange 7 (Argile-25%de sable limoneux)

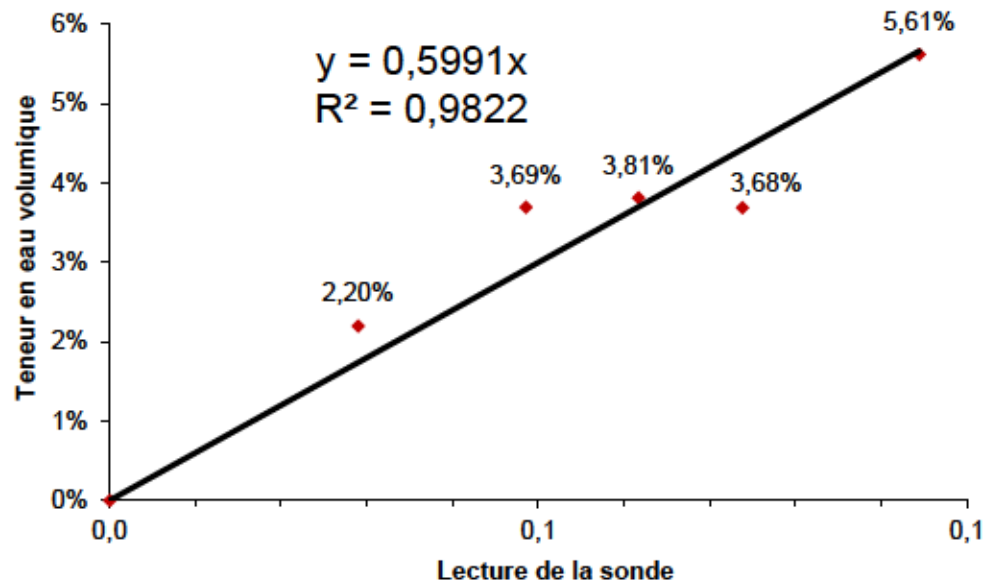


Figure 28 Courbe de calibrage du Sable fin

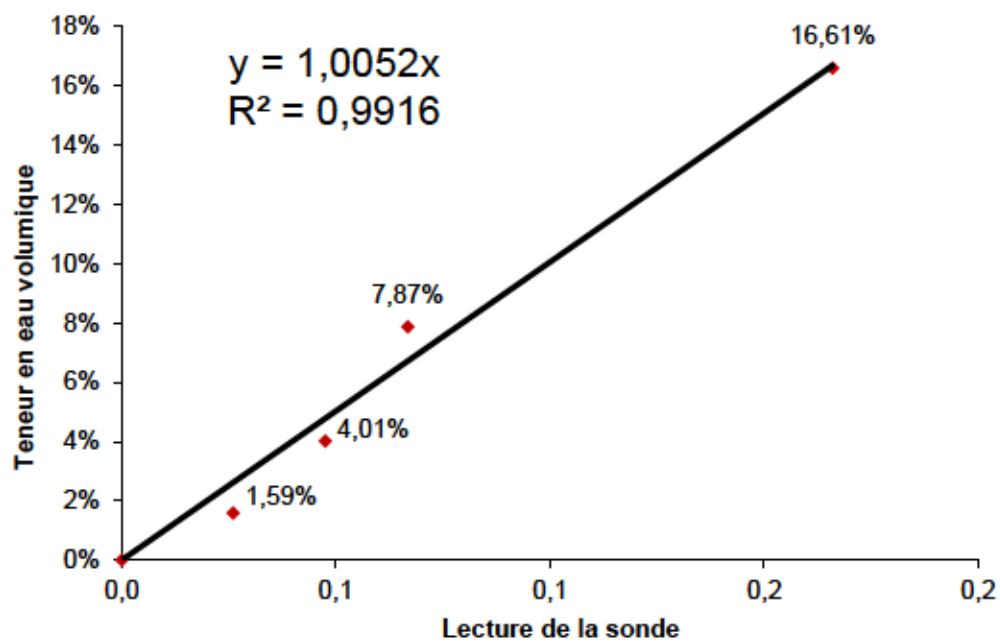


Figure 29 Courbe de calibrage des Résidus

4. CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Après la préparation des mélanges, et le montage des colonnes avec les matériaux à base d'argile, le suivi des colonnes a été effectué afin d'évaluer la capacité des matériaux argileux abitibiens à limiter le flux d'eau vers les résidus réactif sous-jacent.

Il est important de rappeler que les matériaux de base utilisés dans le cadre de cette étude sont : l'argile, le sable limoneux et le sable fin. Ces matériaux ont été mélangés, afin d'obtenir des mélanges à base d'argile à des proportions allant de 5 à 25% de sable limoneux et de sable fin (voir Tableau 7).

Ensuite, les mélanges préparés ont été mis en place comme recouvrement dans des colonnes expérimentales en laboratoire. Les différents matériaux conçus à base d'argile ont fait l'objet de caractérisations physique, géotechnique et hydrogéologique.

Il est donc important de présenter les résultats obtenus, afin de monter l'impact de l'ajout de ces amendements sur les propriétés de base des matériaux argileux et d'évaluer leur capacité à limiter le flux d'eau.

4.1 Caractérisations physiques

4.1.1 Densité relative (G_s)

Le G_s des matériaux à base d'argile maigre, a été déterminé, en utilisant le Pycnomètre à hélium (Quantachrome Ultrapyc 1200^e) au laboratoire de l'URSTM et en utilisant la norme ASTM D-18 (ACD-o Soil, 2006).

Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableau 10 et Tableau 11.

Pour les matériaux argileux amendés avec du sable fin, les G_s obtenus se situent entre 2,63 et 2,64. De ce fait l'ajout de ce type d'amendement n'a pas engendré de modification notable du G_s par rapport à celui de l'argile.

Tableau 10 Densité relative des grains solides des matériaux à base d'argile composés de mélange d'argile maigre et de sable fin

Matériaux utilisés	Mél.1	Mél.4 5% sable fin	Mél.2 15% sable fin	Mél.5 25% sable fin
G _s	2,63	2,64	2,64	2,63

Pour les matériaux argileux amendés avec du sable limoneux, les G_s obtenus se situent entre 2,64 et 2,65 respectivement pour les mélanges amendés avec 5 et 25 % de sable fin. De ce fait, l'ajout de ce type d'amendement a engendré une légère augmentation du G_s par rapport à celui de l'argile (2,63).

Tableau 11 Densité relative des grains solides des matériaux à base d'argile composés de mélange d'argile et de sable limoneux

Matériaux utilisés	Mél.1	Mél.6 5% sable limoneux	Mél.3 15% sable limoneux	Mél.7 25% sable limoneux
G _s	2,63	2,64	2,64	2,65

Par ailleurs un calcul théorique du G_s selon des proportions de sable et d'argile a été effectué en utilisant l'équation :

$$G_{S,M} = \frac{G_{S,a} \times G_{S,s}}{(G_{S,s} \times a\%) + (G_{S,a} \times S\%)} \quad \text{Éq. 39}$$

Tels que :

G_{S,M} : G_s du mélange argile-sable,

G_{S,a} : G_s de l'argile,

G_{S,s} : G_s du sable,

a% : Pourcentage d'argile dans le mélange,

S% : Pourcentage de sable dans le mélange.

En effet, les valeurs théoriques des G_s obtenus pour les mélanges ayant 5% 15% et 25% de sables étaient de 1,82 2,63 et 2,64 respectivement démontrant que l'ajout de sable a tendance à augmenter la valeur du G_s , ce qui revient à supposer que la valeur du G_s du Mélange numéro 5 ayant 25% de sable fin qui est de 2,63 a été probablement sous-estimés durant les essais en laboratoire

4.1.2 Granulométrie

Les courbes granulométriques obtenues après analyse aux granulomètre laser sont présentées à la Figure 30.

Cette dernière montre que toutes les courbes granulométriques des matériaux amendés se trouvent en dessous de celle de l'argile, à l'exception de celle du mélange à 95% d'argile et 5% de sable limoneux (mélange 6) qui se retrouve légèrement au-dessus de la courbe granulométrique de l'argile maigre.

La Figure 30 montre que l'ajout d'amendement a engendré un éloignement des courbes granulométriques vers la zone plus grossières (à l'exception du mélange 6).

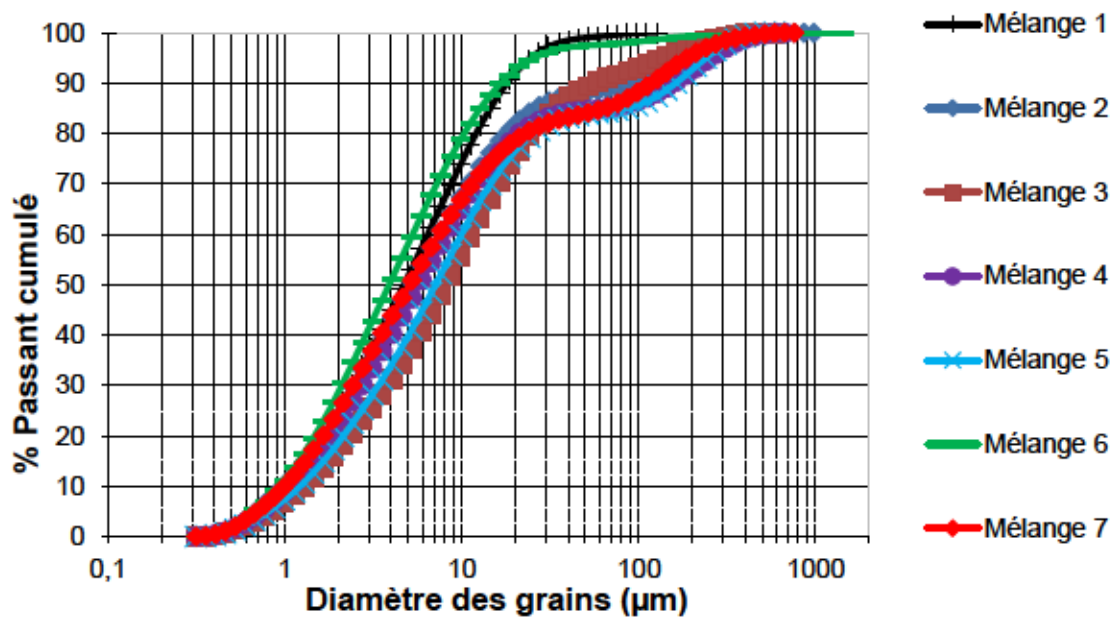


Figure 30 Courbes granulométriques des matériaux étudiés

En utilisant les courbes granulométriques des matériaux étudiés, les pourcentages de fraction argileuse, de silt, de sable fin et moyen ont été déterminés. Les proportions de ces différentes fractions granulométriques ont permis de classer ces différents mélanges (voir Tableau 12 et Tableau 13). Selon la classification ASTM D 2487, tous nos matériaux à base d'argile sont des argiles maigres (CL).

Cependant, le mélange 5 à base d'argile ayant 75% d'argile maigre et 25% de sable limoneux correspond à une argile maigre avec du sable.

Les différents paramètres granulométriques sont également présentés au Tableau 12 et 13. Ainsi pour les mélanges à base de sable limoneux, le C_U est compris entre 5,72 et 8,91 respectivement pour les mélanges avec 5 et 15 % d'amendement. Pour les mélanges à base de sable fin, le C_U est compris entre 5,56 et 8,24 respectivement, pour les amendements de 15 et 25 %. Le C_C des mélanges amendés avec du sable limoneux se situent entre 0,79 et 1,00 respectivement pour les proportions d'amendement de 25 et 15 %. Quant aux C_C des mélanges amendés avec du sable fin, ce dernier se situent entre 0,85 et 0,94 respectivement pour les mélanges avec 5% et 25% d'amendement.

Il est important de mentionner que tous nos matériaux à base d'argile ont des granulométries semi-étalées, puisque leurs coefficients d'uniformité respectifs sont supérieurs à 5 et inférieurs ou égaux à 20 (Robitaille & Tremblay, 1997).

En analysant les résultats de la classification granulométrique des différents mélanges conçus, et en les comparant aux critères d'utilisation des matériaux à base d'argile comme barrières hydrauliques, on peut affirmer que :

- Les pourcentages de particules argileuses (inférieurs à 2 μm) sont supérieurs à 15%;
- Les pourcentages de particules fines (< 74 μm) sont supérieurs à 30% et leurs pourcentages de graviers sont nulle.

Tableau 12 Classification granulométrique des matériaux amendés avec du sable limoneux

Matériaux utilisés	100% Argile maigre	Mél.6 5% sable limoneux	Mél.3 15% sable limoneux	Mél.7 25% sable limoneux
Cu	6,44	5,72	8,91	7,46
Cc	0,90	0,90	1,00	0,79
D10 (µm)	1,00	0,92	1,28	0,99
D30 (µm)	2,4	2,09	3,82	2,42
D60 (µm)	6,42	5,27	11,40	7,42
D90 (µm)	18,00	16,70	56,30	118,00
Type de granulométrie	Semi-étalée	Semi-étalée	Semi-étalée	Semi-étalée
% Fraction argileuse (< 2 µm)	25,00	29,00	17,00	26,00
% Silt (75 µm - 2 µm)	75,00	69,00	75,00	60,00
% Sable fin (425 µm - 75 µm)	0,00	2,00	8,00	13,00
% Sable moyen (425 µm-2 mm)	0,00	0,00	0,00	1,00
Classification (ASTMD2487)	Argile maigre (CL)	Argile maigre (CL)	Argile maigre (CL)	Argile maigre (CL)

Tableau 13 Classification granulométrique des matériaux amendés avec du sable fin

Matériaux utilisés	100% Argile	Mél.4 5% sable fin	Mél.2 15% sable fin	Mél.5 25% sable fin
Cu	6,44	7,67	5,56	8,24
Cc	0,90	0,85	0,94	0,94
D10 (µm)	1,00	1,07	1,00	1,21
D30 (µm)	2,4	2,74	2,29	3,37
D60 (µm)	6,42	8,21	5,56	9,97
D90 (µm)	18,00	158,00	14,30	162,00
Type de granulométrie	Semi-étalée	Semi-étalée	Semi-étalée	Semi-étalée
% Fraction argileuse (< 2 µm)	75,00	23,00	25,00	19,00
% Silt (75 µm - 2 µm)	25,00	62,00	64,00	66,00
% Sable fin (425 µm - 75 µm)	0,00	14,00	10,00	15,00
% Sable moyen (425 µm-2 mm)	0,00	1,00	1,00	0,00
Classification (ASTMD2487)	Argile maigre (CL)	Argile maigre (CL)	Argile maigre (CL)	Argile maigre avec du sable (CL)

4.1.3 Caractérisation géotechnique

4.1.3.1. Limites d'Atterberg des matériaux à base d'argile

Les résultats des limites de liquidité et de plasticité obtenus sont présentés au Tableau 14.

Tableau 14 Limites d'Atterberg des matériaux à base d'argile

% de Matériaux utilisés dans les mélanges à base d'argile	Limite de liquidité WL (%)	Limite de plasticité WP (%)	Indice de plasticité IP (%)
100% Argile maigre	29,08	19,00	10,08
A-SL5 (Argile-5% de sable limoneux)	31,02	19,30	11,72
A-SL15 (Argile-15% de sable limoneux)	29,47	16,20	13,27
A-SL25 (Argile-25% de sable limoneux)	26,10	15,00	11,10
A-SF5 (Argile-5% de sable fin)	33,72	22,80	10,92
A-SF15 (Argile-15% de sable fin)	31,13	21,10	10,03
A-SF25 (Argile-25% de sable fin)	29,07	19,70	9,37

On observe que, l'ajout de sable fin à l'argile a engendré des modifications au niveau de la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité des matériaux amendés. Les valeurs les plus élevées des limites de liquidité et des limites de plasticité ont été observées au niveau du mélange avec 5 % des sable fin.

L'ajout de sable limoneux à l'argile a engendré une diminution de la limite de liquidité et de la limite de plasticité de cette catégorie de mélange. Ce constat est également valable pour l'indice de plasticité de ces mélanges à l'exception de celui conçu avec 15% de sable limoneux.

En utilisant les limites de liquidités et les indices de plasticités de nos matériaux à base d'argile, le diagramme de plasticité (Figure 31) a été construit afin de classer ces matériaux.

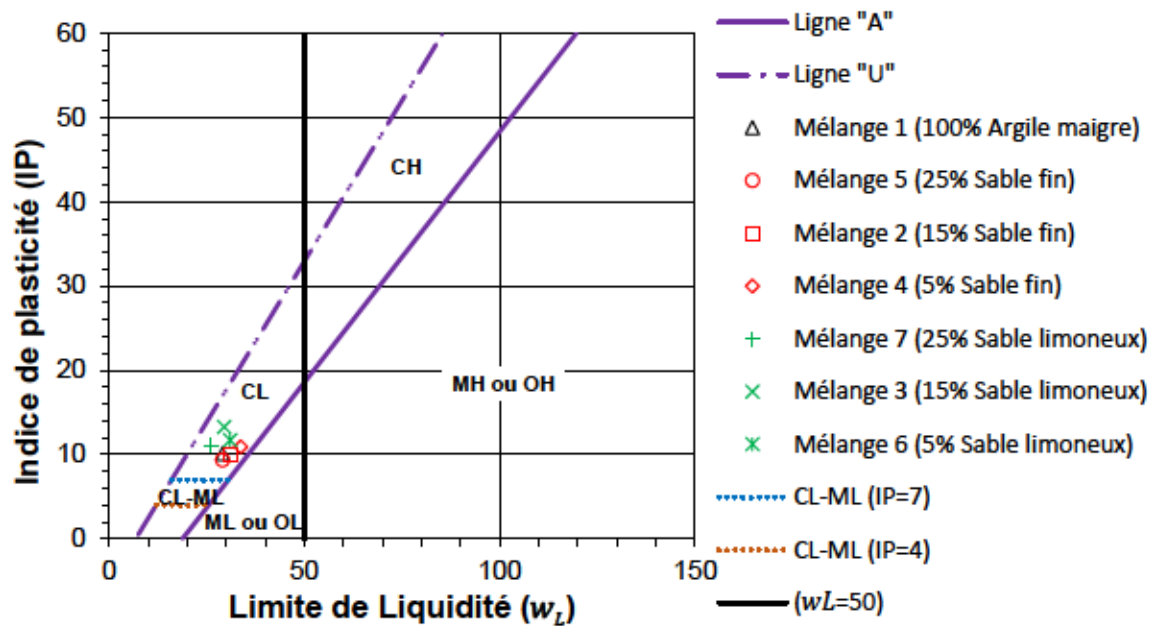


Figure 31 Diagramme de plasticité et zones de classification des matériaux

Les acronymes dans le diagramme de plasticité ci-dessus représentent les catégories des matériaux suivants (Robitaille & Tremblay, 1997):

- CL : Argile inorganique de plasticité faible ou moyenne ;
- ML : Silt inorganique de faible plasticité ;
- OL : Silt organique de faible plasticité ;
- CH : Argile inorganique de haute plasticité ;
- MH : Silt inorganique de haute plasticité ;
- OH : Argile organique de haute plasticité ;

Selon la position des points dans le diagramme représentant des intersections entre les limites de liquidité et les indices de plasticités, on remarque que les différents mélanges à l'étude se retrouvent tous dans la zone (CL). On peut donc affirmer que tous nos matériaux à base d'argile, sont des argiles inorganiques de faible plasticité.

4.1.3.2. Activité des matériaux à base d'argile

L'activité de nos matériaux à base d'argile a été évaluée en calculant le ratio de l'indice de plasticité sur le pourcentage d'argile (pourcentage de particules inférieures à deux microns) (McCarthy, 1977). Cette détermination de l'activité est cruciale dans l'évaluation du degré de gonflement d'une argile (sa capacité à attirer des molécules d'eau). Ainsi l'activité des mélanges d'argile amendée sont présentées au Tableau 15.

Tableau 15 Activité et classification des matériaux à base d'argile

Matériaux	Activité	Classification
100% Argile maigre	0,40	Argile inactive
5% de Sable limoneux	0,43	Argile inactive
15% de Sable limoneux	0,78	Argile normale
25% de Sable limoneux	0,43	Argile inactive
5% de Sable fin	0,50	Argile inactive
15% de Sable fin	0,39	Argile inactive
25% Sable fin	0,49	Argile inactive

Ainsi, comme le montre le Tableau 15, l'activité des mélanges à l'étude se situe entre 0,39 et 0,50, à l'exception du mélange conçu avec 15% de sable limoneux. De ce fait, les matériaux à base d'argile étudiés ont généralement une activité inférieure à 0,75, et sont donc classés comme des argiles inactives, à l'exception du mélange avec 15 % de sable fin, qui est classé comme une argile normale, car cette catégorie de mélange a une activité élevée (0,78) comparé aux autres mélanges. En effet les particules fines de ce mélange ont probablement tendance à remplir les espaces vides entre les particules plus grossières de sable limoneux, ce qui a tendance à rendre ce mélange plus plastique et plus susceptible de résister aux déformations, cela se traduit par une activité d'autant plus élevée puisque les particules de sable limoneux pourrai séparer les particules d'argiles, réduisant ainsi les force d'attractions entre elle, ce qui pourrai par conséquent réduire les force d'adhésion et par conséquent limiter l'attraction des molécules d'eau dans ce mélange.

On peut donc affirmer que les matériaux à base d'argile ont un faible potentiel de gonflement en raison de leurs faibles activités.

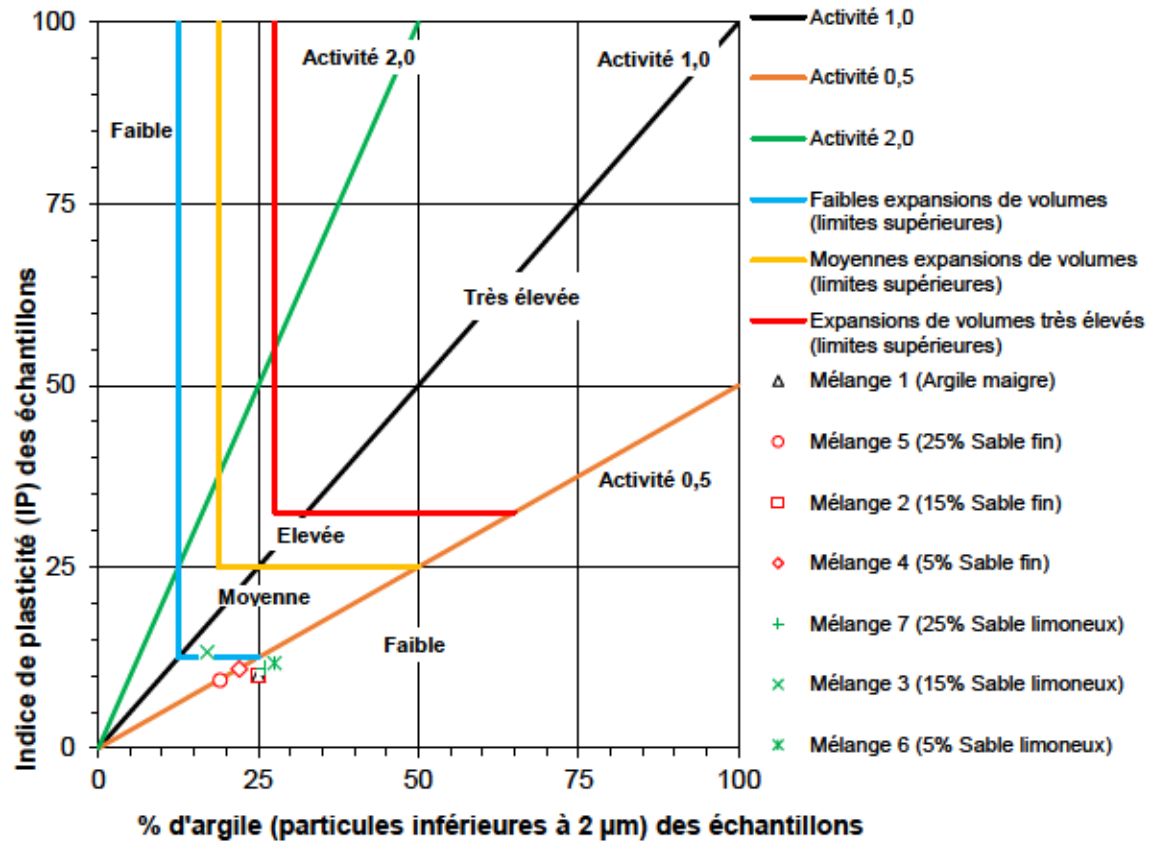


Figure 32 Classification du potentiel de changement de volume (sols argileux)

En représentant les activités des mélanges à base d'argile dans le diagramme de l'indice de plasticité versus le pourcentage d'argile à la Figure 32, on peut observer que tous nos matériaux à base d'argile se retrouvent dans la catégorie de type faible activité à l'exception du mélange 3 qui se trouve dans la catégorie moyenne.

Selon la classification des argiles en fonction de leurs potentiels de changement de volume (McCarthy, 1977), les matériaux à l'étude ont une expansion potentielle de volume inférieur à 2% à l'exception du mélange 3 dont l'expansion se situe entre 2 et 5%. De ce fait, nos matériaux à base d'argile devraient théoriquement être moins affectés par les effets de gel et dégel en raison de leur faible potentiel d'expansion de volume.

4.1.4 Caractérisations hydrogéologiques

4.1.4.1. Conductivités hydrauliques saturées

Les conductivités hydrauliques saturées ont été mesurées à l'aide du perméamètre à paroi flexible pour les matériaux à base d'argile et du perméamètre à parois rigide pour les matériaux plus grossiers, tels que les sables limoneux et argileux. Ainsi les résultats obtenus en laboratoire sont présentés au Tableau 16.

Tableau 16 k_{sat} mesurée des matériaux à base d'argile

Matériaux	k_{sat} mesurée (m/s)	Porosité (n)
100% Argile maigre (Mél.1)	$2,13 \times 10^{-10}$	0,37
5% de Sable limoneux (Mél.6)	$1,10 \times 10^{-10}$	0,36
15% de Sable limoneux (Mél.3)	$8,52 \times 10^{-10}$	0,38
25% de Sable limoneux (Mél.7)	$1,39 \times 10^{-10}$	0,37
5% de Sable fin (Mél.4)	$1,86 \times 10^{-10}$	0,34
15% de Sable fin (Mél.2)	$3,51 \times 10^{-10}$	0,34
25% de Sable fin (Mél.5)	$1,04 \times 10^{-10}$	0,34

Le Tableau 16 montre que les k_{sat} mesurées se situent entre $1,10$ et $8,52 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ respectivement pour le mélange à base d'argile ayant 5 % de sable limoneux et le mélange ayant 15% de sable limoneux.

La valeur typique de conductivité hydraulique saturée des argiles inorganiques de faible plasticité (CL) est de $1,00 \times 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ (Tinjum et al., 1997) et les valeurs de k_{sat} obtenues pour les matériaux à base d'argile sont légèrement supérieures.

Toutefois, tous les matériaux à base d'argile à l'étude ont une conductivité hydraulique saturée inférieure à 10^{-9} (m/s) . De ce fait, ils remplissent donc l'un des critères requis susmentionné, afin qu'ils puissent être utilisés comme barrière hydraulique.

4.1.4.2. Courbes de rétention d'eau.

Les courbes de rétention d'eau des différents matériaux ont été obtenues à l'aide de la cellule de pression pour les matériaux à base d'argile. À l'issue de ces essais réalisés en laboratoire, différents points de teneur en eau en fonction des succions appliquées ont été obtenus. Et ce sont ces derniers, qui ont permis d'obtenir les courbes de rétentions d'eau des différents matériaux à l'étude (voir les Figures ci-dessous). Ces différentes courbes peuvent être ajustées (lissées) à l'aide du modèle de van Genuchten et kovacs modifié.

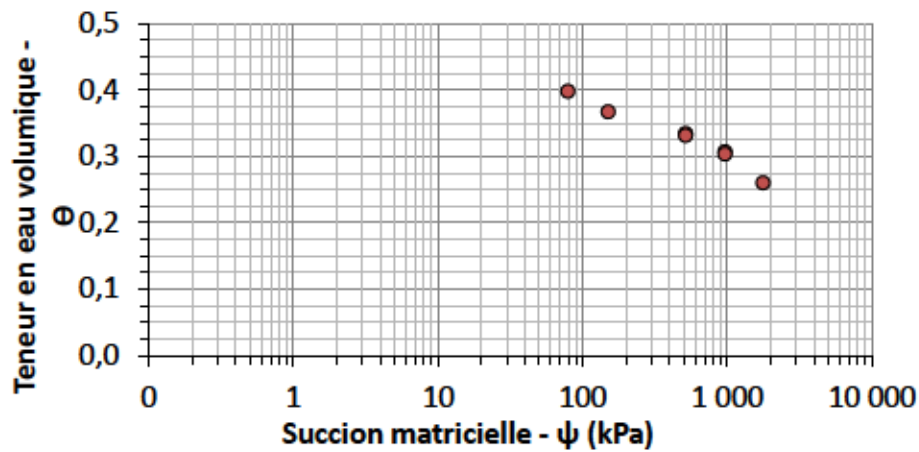


Figure 33 CRE du mélange 1

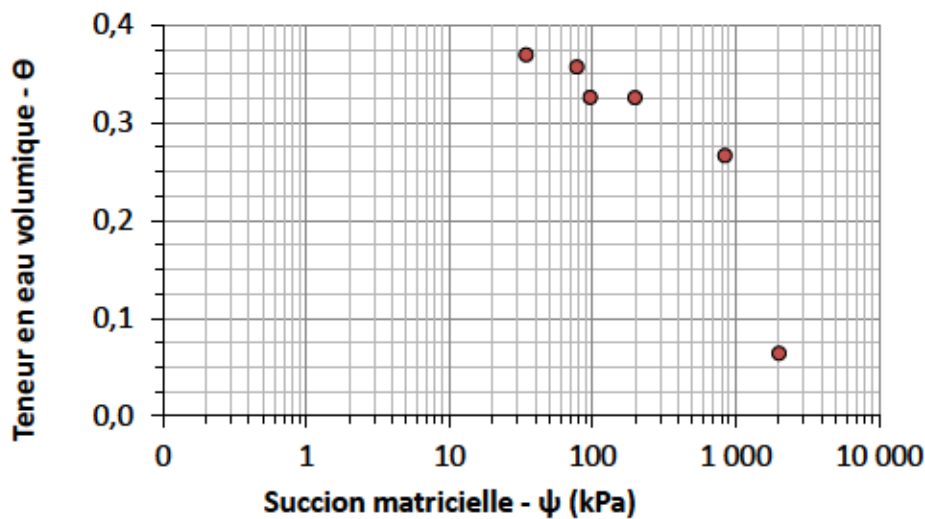


Figure 34 CRE du mélange 2

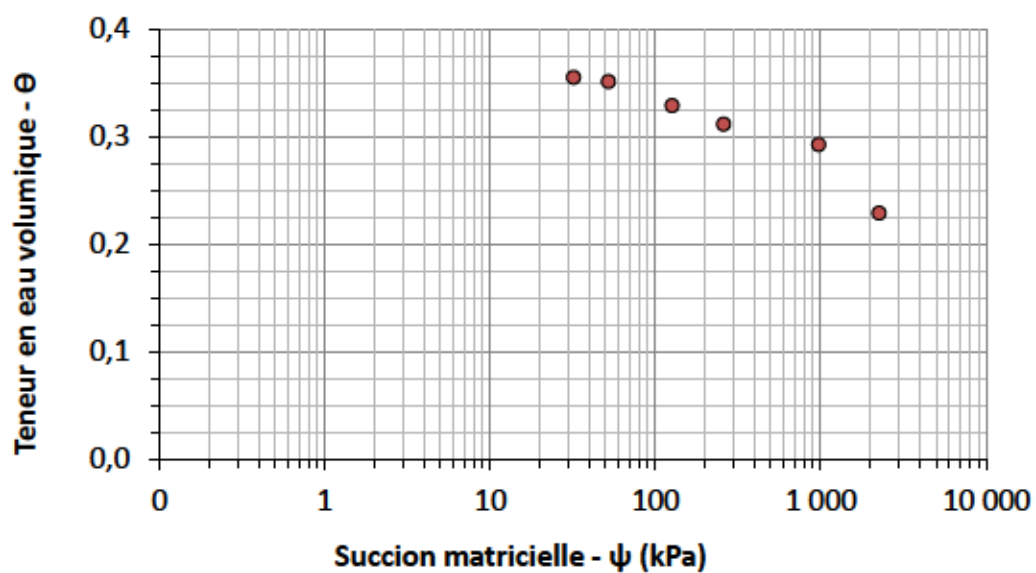


Figure 35 CRE du mélange 3

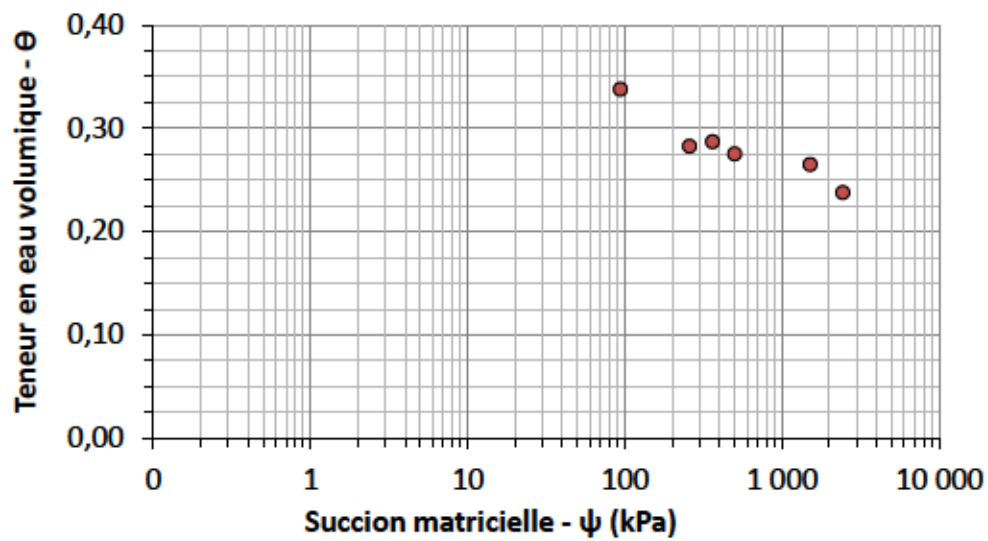


Figure 36 CRE du mélange 4

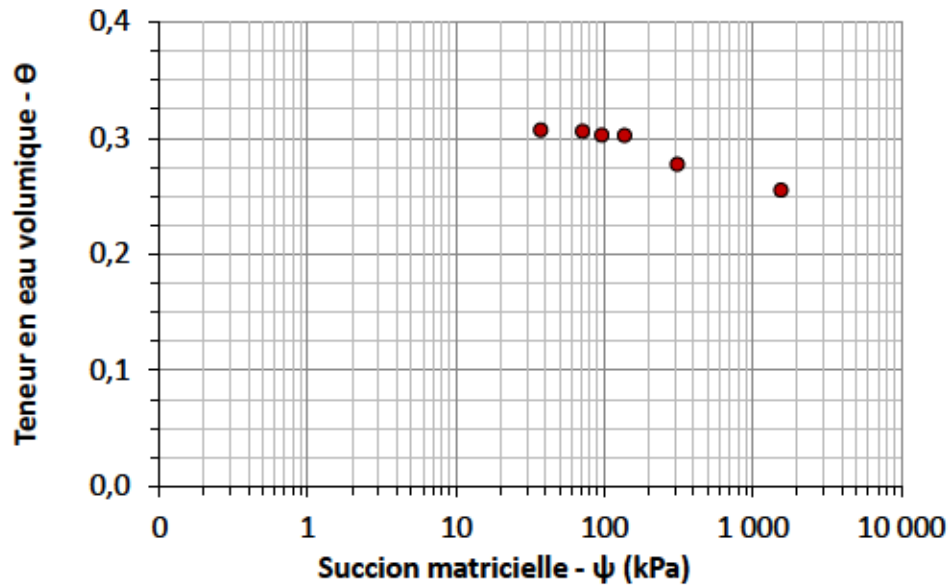


Figure 37 CRE du mélange 5

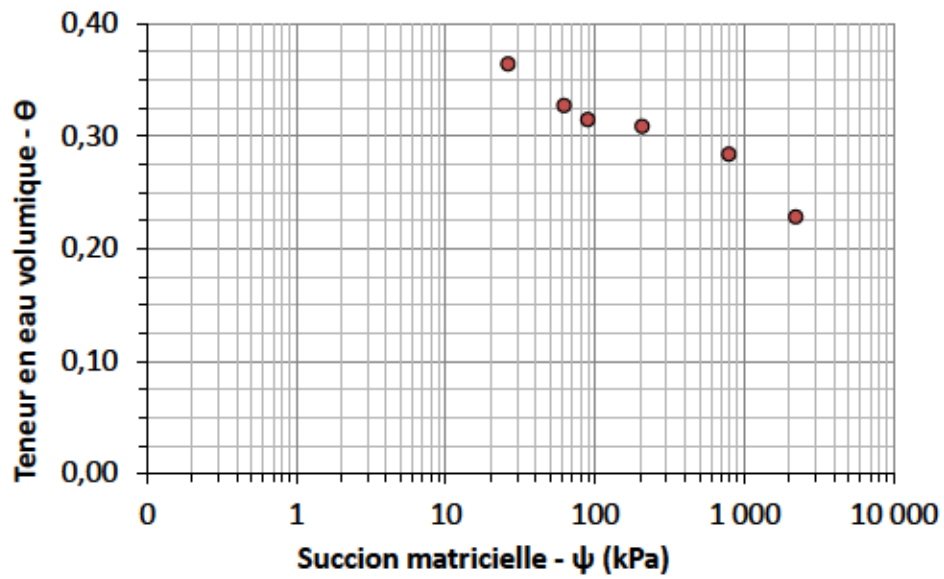


Figure 38 CRE du mélange 6

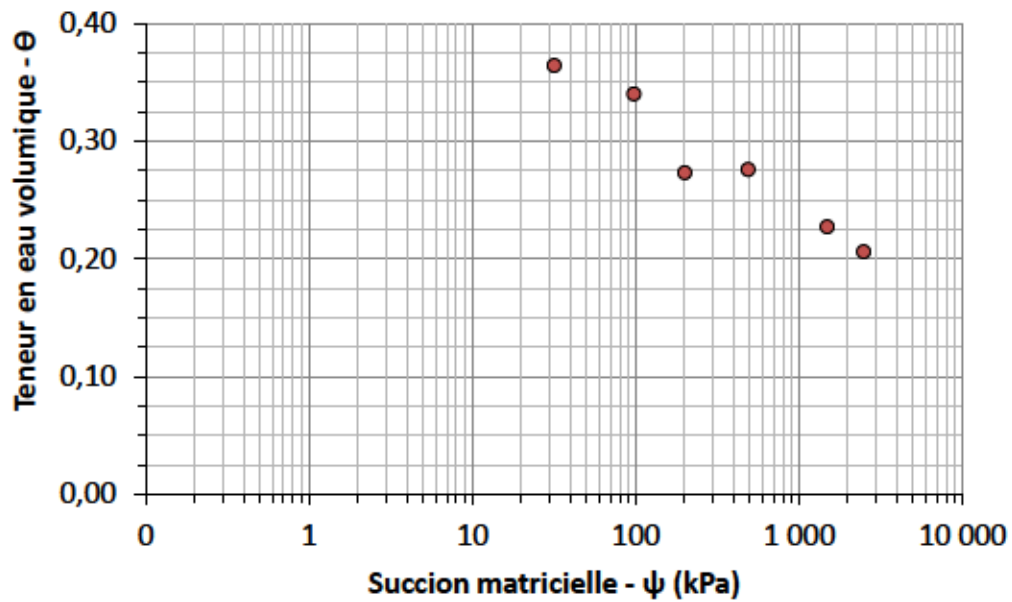


Figure 39 CRE du mélange 7

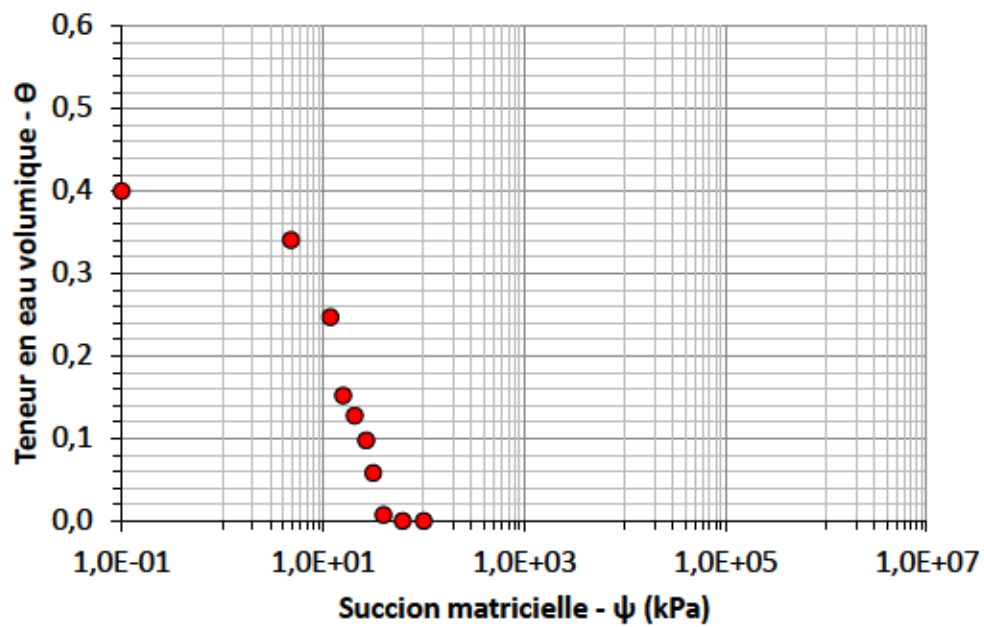


Figure 40 CRE du sable limoneux

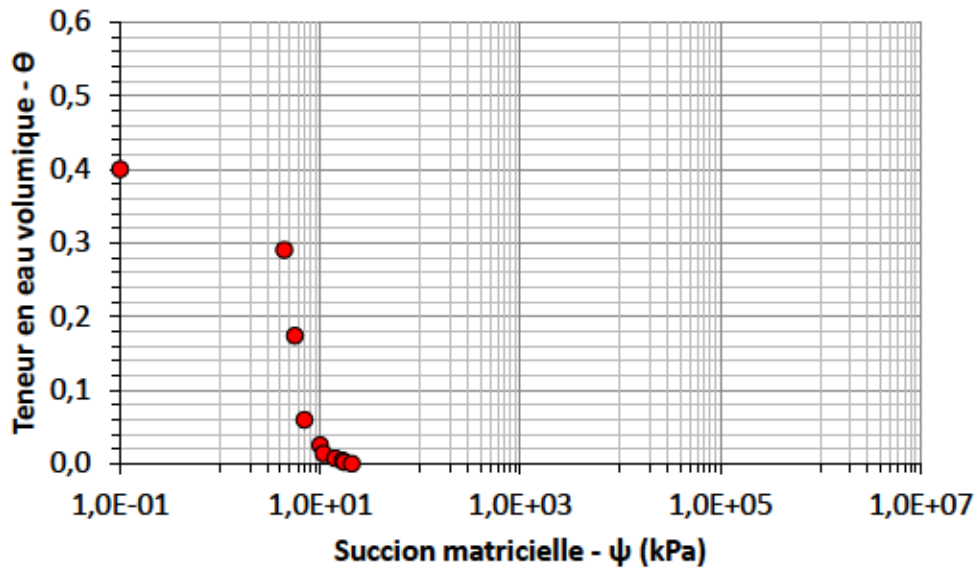


Figure 41 CRE du sable fin

Les CRE ont été utilisées pour évaluer les pressions d'entrée d'air (AEV) en utilisant la méthode des tangentes et les résultats sont présentés au Tableau 17. Ce dernier montre que les AEV se situent entre 53 kPa et 150 kPa respectivement pour le mélange avec 5% de sable limoneux et le mélange avec 5% de sable fin.

On peut également constater que pour les mélanges avec le sable fin, l'augmentation de la proportion des amendements a engendré une augmentation au niveau des AEV. Parce que plus la quantité d'amendements de sable fin augmente dans le mélange plus la porosité diminue, ce qui est probablement dû au fait que dans les mélanges argile-sable plus les pourcentages de sable fin augmentent plus les matériaux fins ont tendance à combler les vides des matériaux plus grossiers ce qui réduit la porosité.

Quant aux mélanges avec le sable limoneux, une tendance inverse a été observé. En d'autres termes, l'augmentation des proportions de l'amendement dans ce cas de figure a plutôt engendré une baisse des AEV, probablement dû à cause de l'ajout de matériaux grossier (sable limoneux) qui a tendance à augmenter la porosité des matériaux amendé avec le sable limoneux.

Tableau 17 AEV des matériaux

Matériaux	Pression d'entrée d'air AEV (kPa)	Porosité (n)
Mél. 1 (100% Argile)	150	0,44
Mél. 2 (15% de Sable fin)	77	0,33
Mél. 3 (15% de Sable limoneux)	57	0,35
Mél. 4 (5% de Sable fin)	150	0,34
Mél. 5 (25% de Sable fin)	75	0,31
Mél. 6 (5% de Sable limoneux)	53	0,37
Mél. 7 (25% de Sable limoneux)	60	0,32

L'écart observé entre les deux valeurs d'AEV des mélanges 4 et 5 est probablement due au fait que les mélanges de 5% de sable fin exercent une faible influence sur la porosité du mélange 5 tels, que ces derniers aient le même AEV que le mélange 1 composés de matériaux non amendés. Les résultats des différentes caractérisations permettent ainsi de conclure que les matériaux amendés à base d'argile peuvent être utilisés adéquatement comme matériaux de construction des CFCHS, puisque leurs limites de liquidité sont supérieures à 20%, leurs indices de plasticité sont compris entre 7% et 20%, leurs pourcentages de particules argileuses sont supérieurs à 15%, leurs pourcentages de particules fines sont supérieurs à 30%, leurs conductivités hydrauliques saturées sont inférieures à 10^{-9} (m/s) et enfin, leurs pourcentages de graviers sont nulles. De plus, leurs activités et leurs potentiels d'expansion sont assez faibles, et de ce fait ils seront moins susceptibles aux gonflements.

En conclusion et en se basant sur les résultats des caractérisations, les matériaux à base d'argile sont des matériaux naturels possédant des propriétés leur permettant d'être utilisés comme barrière hydraulique. Cependant, il est nécessaire d'évaluer la capacité des recouvrements à base d'argile à limiter le flux d'eau d'atteindre les résidus réactifs sous-jacents.

4.2 Comportement hydrogéologique des recouvrements conçus à base d'argile non amendée et amendée

Durant les essais en laboratoire et après la saturation des matériaux, les colonnes sont demeurées saturées et même une accumulation d'eau visible à la surface des recouvrements a été observée en permanence malgré les succions qui ont été imposées en bas des colonnes et ce, pendant plusieurs mois.

Cette accumulation d'eau à la surface montre clairement le caractère imperméable (voir étanche) de ces recouvrements conçus à base d'argile. En raison de l'instrumentation des différentes colonnes à l'aide des sondes pour les mesures des teneurs en eau volumiques et des succions, le comportement des recouvrements sera illustré à l'aide des mesures en continue de ces deux paramètres.

Dans cette section on présente les mesures qui ont été réalisées au niveau des différentes colonnes.

- Résidus miniers sans recouvrement (Colonne 9 témoin)

La colonne témoin a été soumise à différents cycles de mouillage et de drainage. Les matériaux ont été mouillés toutes les quatre semaines en utilisant de 2 litres d'eau déminéralisée et désionisée, avec pour objectif de saturer les matériaux.

Cette colonne témoin a été expérimenté pour évaluer le comportement hydrogéologique de ses résidus sans recouvrement et comparer les valeurs obtenues à celle des résidus ayant des recouvrements à base d'argile, afin d'évaluer l'efficacité de ces dernières.

Les mesures de succions effectuées à différents niveaux dans la colonne témoin (résidus sans recouvrement) sont présentées à la Figure 42.

Cette figure montre que la majorité des succions mesurées sont supérieures à l'AEV des résidus miniers (8 kPa) à l'exception des succions enregistrées lors des périodes de mouillage au niveau des port 2 et 3. Ces valeurs de succions indiquent une désaturation de ce matériau au niveau de la zone supérieure, inférieure et centrale de la colonne témoin.

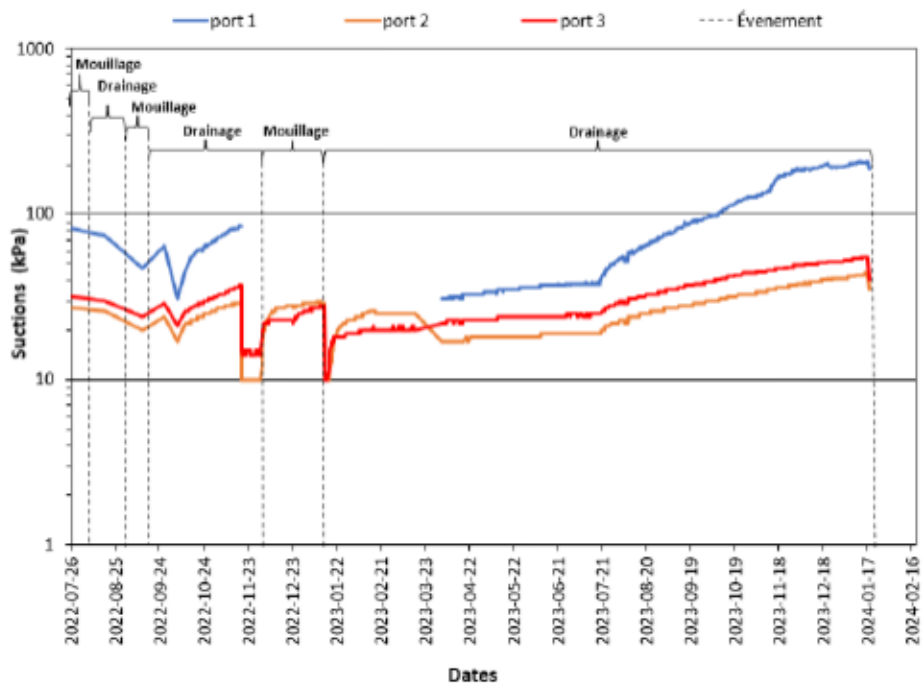


Figure 42 Mesures des succions au niveau de la colonne témoin

Les teneurs en eau volumiques mesurées au niveau de la colonne témoin, sont présentées à la Figure 43.

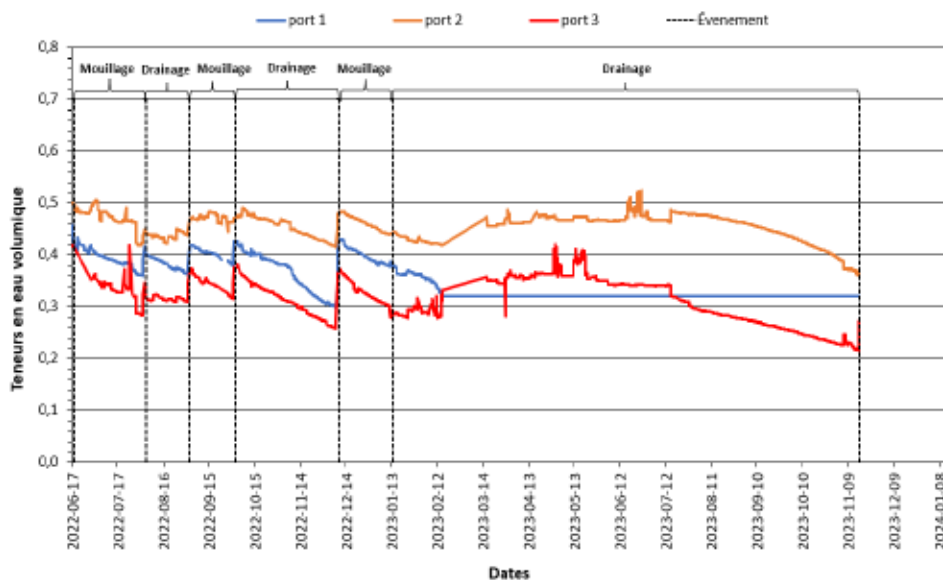


Figure 43 Résultats des teneurs en eau de la colonne témoin

Les teneurs en eau volumiques varient entre 0,298 et 0,458, entre 0,359 et 0,523 et entre 0,215 et 0,420 respectivement au niveau du Port 1, 2 et 3 (voir Figure).

On observe que les teneurs en eau volumiques sont plus faibles dans la zone supérieure des résidus (port 3) et dans la zone inférieure (Port 1), comparativement aux teneurs en eau enregistrées dans la zone centrale (port 2). En effet, lorsque l'eau est ajoutée au niveau de la zone supérieure des résidus de la colonne 9, on observe que cette eau de rinçage s'écoulait plus rapidement dans la zone supérieure des matériaux à cause des chemins préférentiels présent dans cette zone qui facilitaient la percolation rapide de l'eau vers la zone centrale et inférieure des résidus.

Les mesures réalisées au niveau de cette colonne montrent une succession de cycle d'augmentation et de baisse de teneurs en eau volumiques. Ces cycles sont étroitement liés aux cycles de mouillages et de drainage.

- Recouvrement conçu avec de l'argile non amendée (Colonne 1)

Les mesures de succions, réalisées au niveau du recouvrement d'argile non amendée, sont présentées à la Figure 44. Cette figure montre que toutes les mesures effectuées au niveau de l'argile non amendée restent inférieures à son AEV qui est de 150 kPa, indiquant ainsi que ce matériel argileux est resté saturé durant toute la période de l'étude. De plus, les succions mesurées dans les résidus (Port 1) étaient comprises entre 0 et 1 kPa, indiquant aussi que ces derniers sont restés saturés, car les succions enregistrées sont inférieures à l'AEV des résidus qui est de 8 kPa. Les résidus sont restés saturé bien que la nappe simulée physiquement se trouvait à 2,2 m de profondeur (soit à environ 21 kPa en plus du pompage) alors qu'au niveau de la colonne témoin la désaturation des résidus a été observée lors des processus de drainage.

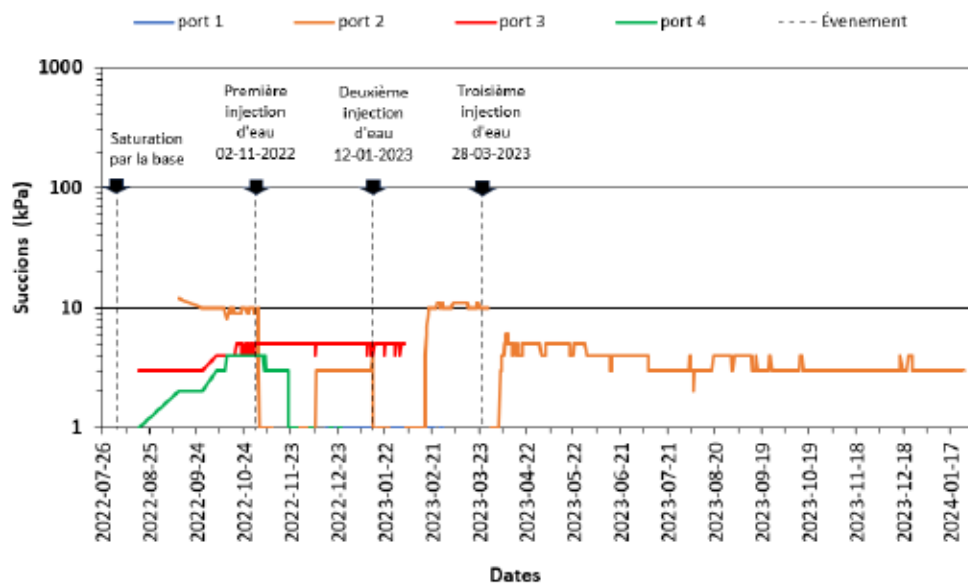


Figure 44 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement d'argile sans amendement

Les mesures des teneurs en eau volumiques sont présentées à la Figure 45.



Figure 45 Teneurs en eau volumiques mesurées dans la colonne simulant le recouvrement d'argile sans amendement

On peut remarquer que, dans la zone supérieure du recouvrement (Port 4), les teneurs en eau volumétriques sont comprises entre 0,293 et 0,701. Le Port 3 dans la zone centrale du recouvrement situé à 70 cm de la base de la colonne n'était pas fonctionnel. La plus faible valeur a été mesurée, lors d'une baisse brutale des teneurs en eau volumiques. Après cette baisse, on a assisté à une augmentation importante des teneurs en eau volumiques.

Il est important de mentionner que durant cette période de baisse des teneurs en eau volumiques, les mesures de succions n'ont montré aucune variation notable et de ce fait on peut supposer que le capteur a présenté une certaine défektivité. Cette hypothèse est confirmée par l'arrêt total du fonctionnement de ce capteur.

Il est important de mentionner qu'au niveau du Ports 4, les teneurs en eau volumiques ont connu une augmentation au cours de la période de pompage initiée à partir de la base de la colonne qui s'est étalée du 15 juin 2022 au 28 juin 2022. À la suite de cette période, les teneurs en eau volumiques sont restées relativement constantes.

Au niveau de la zone inférieure de la couverture située à 40 cm de hauteur, les valeurs mesurées des teneurs en eau volumétriques au niveau du port 2 sont comprises entre 0,276 et 0,410. Dans les résidus miniers, les teneurs en eau volumiques se sont maintenues entre 0,428 et 0,447.

Au niveau des Ports 1 et 2, des pics notables au niveau des teneurs en eau volumiques ont été observés le 2 novembre 2022, le 12 janvier 2023 et le 28 mars 2023, en raison d'injections d'eau dans les résidus miniers. Quant aux augmentations mesurées du 28 juin au 4 juillet 2022, elles sont liées directement à la saturation de cette colonne qui a été effectuée par le bas.

Il est important de mentionner qu'après chaque injection d'eau, on observe une diminution des succions au niveau des Ports 2, 3 et 4 et une augmentation des teneurs en eau au niveau des Port 2 et 1.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 5 % de sable fin (Colonne 5)

Les mesures de succions mesurées au niveau des différents niveaux de la colonne, à l'exception du niveau supérieur, où le bloc Watermark a été défectueux sont présentées à Figure 46. Cette dernière montre que toutes les succions mesurées au sein du recouvrement d'argile amendée avec 5% de sable limoneux sont demeurées inférieures à l'AEV de ce matériel (AEV = 150 kPa), indiquant ainsi la saturation de ce dernier. On observe également que le pompage effectué du 28 juillet au 08 septembre 2022 a engendré des augmentations au niveau des succions au niveau des résidus (port1) et de la zone inférieure du recouvrement (port2). De plus les injections d'eau dans les résidus, ont engendrer des baisses au niveau des succions.

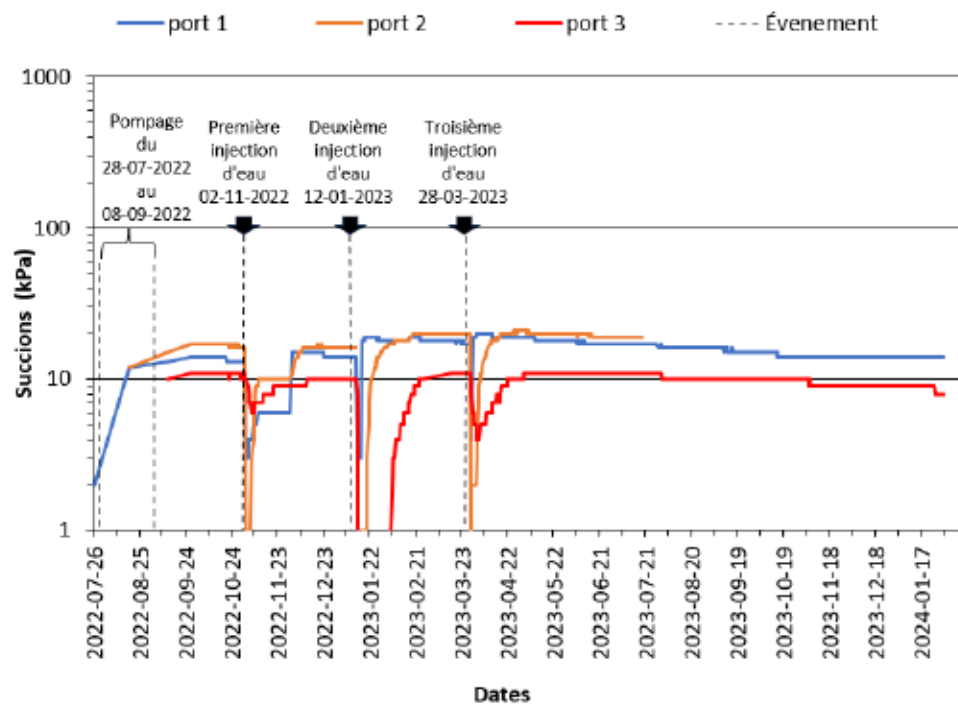


Figure 46 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable fin

Les mesures des teneurs en eau volumiques mesurées au niveau de ce recouvrement sont présentées à la Figure 47.

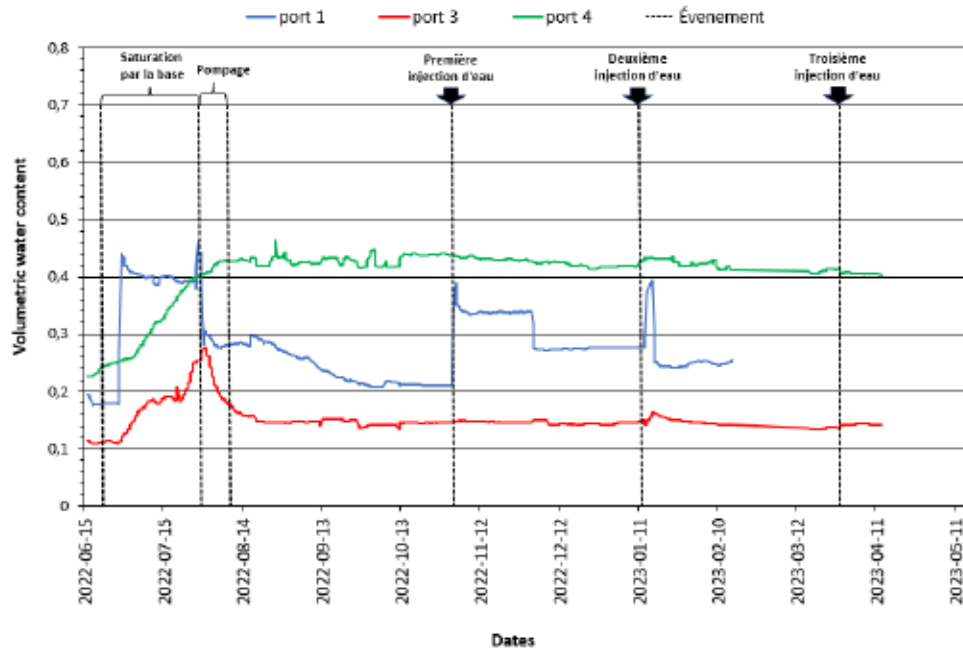


Figure 47 Résultats des teneurs en eau mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable fin

Au niveau du Port 4, les teneurs en eau situées entre 0,225 et 0,465 ont eu tendance à augmenter du 16 juin au 03 août 2023, ensuite les teneurs en eau volumiques se sont stabilisées pour le reste de la période de suivi. Au niveau du Port 3, les teneurs en eau volumiques mesurées se situaient entre 0,108 et 0,276. Il est important de mentionner qu'une augmentation de la teneur en eau volumique a été observée du 27 juin au 30 juillet 2022 en raison de la saturation par le bas.

Au niveau du Port 1, les teneurs en eau volumiques mesurées sont comprises entre 0,176 et 0,462. Les teneurs en eau volumiques élevées qui ont été observées du 30 juin au 28 juillet 2022 ont été engendrées par la saturation de cette colonne par le bas. Cependant, des pics de teneurs en eau volumiques ont été observées le 02 novembre, le 12 janvier et le 28 mars 2023 au niveau des Port 1 et 3. Ces derniers ont été engendrés par l'injection directe d'eau dans les résidus.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 15 % de sable fin (Colonne 2)

Avant de présenter les résultats, il est important de mentionner que les blocs Watermark installés au niveau de la zone centrale du recouvrement ont été défectueux durant l'essai (Port 2).

Les mesures de succions réalisées au niveau de la colonne simulant le recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 15 % de sable fin sont présentées à la Figure 48. Cette figure montre que les valeurs de succion mesurées dans la zone supérieure du recouvrement argileux sont inférieures à 10 kPa, indiquant que ce mélange est resté proche de la saturation, puisque ces valeurs sont inférieures à l'AEV de ce mélange qui est de 77 kPa.

Cependant, les succions mesurées dans les résidus miniers, étaient comprises entre 8 et 49 kPa, indiquant une désaturation de ces derniers, car les succions mesurées à ce niveau sont plus élevées que l'AEV des résidus miniers (environ 8 kPa).

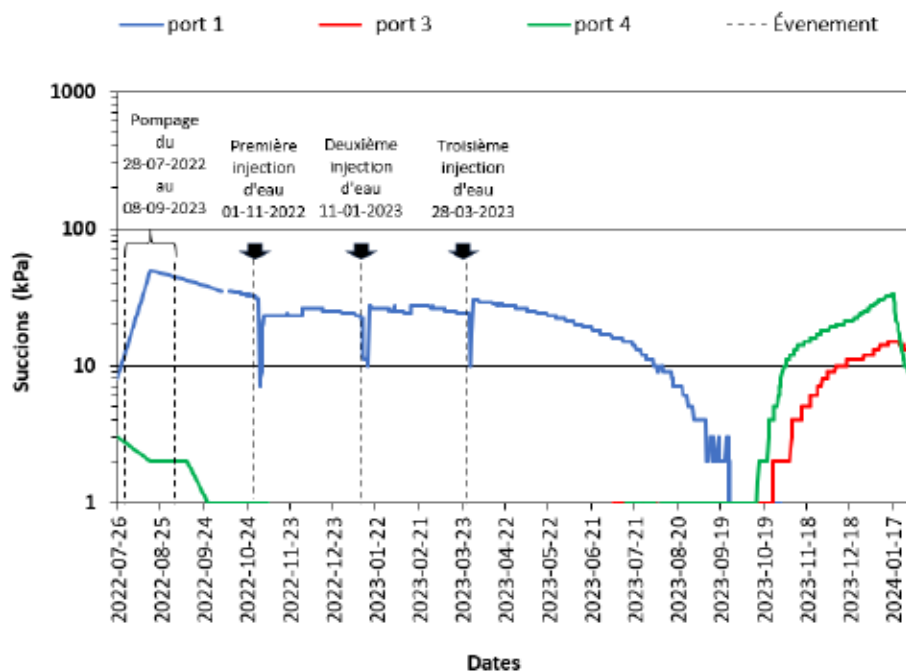


Figure 48 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable fin

Par ailleurs même si l'AEV des résidus est de 8 kPa, la nappe a été placée à 2,2 m à la base de chaque colonne et qui correspond aux conditions réelles de terrain.

Les teneurs en eau volumétriques mesurées au niveau de la colonne simulant ce recouvrement sont présentées à la Figure 49 . On peut remarquer qu'au niveau de la zone supérieure du recouvrement, les teneurs en eau volumétriques sont comprises entre 0,159 et 0,218. Dans la zone centrale du recouvrement (Port 3), les teneurs en eau volumétriques sont comprises entre 0,143 et 0,495. Au niveau de la zone inférieure du recouvrement (Port 2), les teneurs en eau volumétriques sont comprises entre 0,148 et 0,296. Dans les résidus miniers (Port 1), les teneurs en eau volumétriques se situaient entre 0,240 et 0,441.

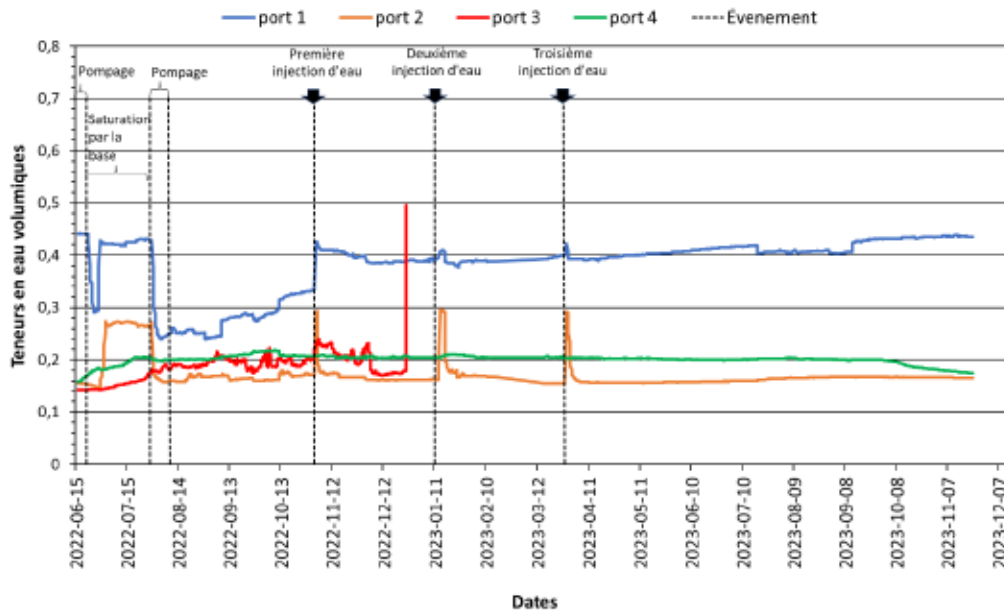


Figure 49 Teneur en eau volumétriques mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable fin

Au niveau des Ports 3 et 4, les teneurs en eau ont connu une augmentation au cours de la période de pompage initiée depuis la base de la colonne, notamment durant la période s'étalant du 15 juin 2022 au 28 juin 2022. En effet, le pompage a permis de drainer une partie de l'eau qui était accumulée à la surface du recouvrement. Après cette période, les teneurs en eau volumétriques sont restées relativement stables (faibles fluctuations qui restent dans la marge d'erreur de mesure des équipements) durant le reste de la période de suivi.

Au niveau des Ports 1 et 2, une diminution de la teneur en eau volumique a été observée en raison des pompages effectués du 15 juin 2022 au 28 juin 2022. Cependant, du 28 juin 2022 au 29 juillet 2022, les teneurs en eau ont commencé à augmenter progressivement. Cette augmentation peut être attribuée à la saturation de la colonne par le bas pendant cette période. Par la suite, une baisse de la teneur en eau volumique au niveau Ports 1 et 2 a été observée, durant la période de pompage initiée du 29 juillet au 8 septembre 2022. Après cette période, les teneurs en eau ont augmenté progressivement et des pics notables de teneur en eau volumiques ont été observés le 1^{er} novembre 2022, le 11 janvier 2023 et le 28 mars 2023, en raison d'injections d'eau dans les résidus.

On observe qu'à chaque injection d'eau les succions au niveau du Ports 1 diminuent et les teneurs en eau au niveau des Port 2 et 1 augmentent.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 25 % de sable fin (Colonne 6)

Les mesures de succions réalisées au niveau de la colonne simulant le recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 25 % de sable limoneux sont présentées à la Figure 50.

Cette Figure montre que toutes les valeurs mesurées au sein de l'argile amendée sont en dessous de l'AEV de ce mélange (AEV = 75 kPa).

De ce fait ces valeurs indiquent que ce mélange est resté proche de la saturation. Cependant, les succions mesurées au sein des résidus miniers (port 1) étaient comprises entre 0 et 24 kPa, indiquant une désaturation de ces derniers pendant la période de pompage; en effet durant cette période la majorité des succions enregistrées étaient plus élevées que l'AEV des résidus.

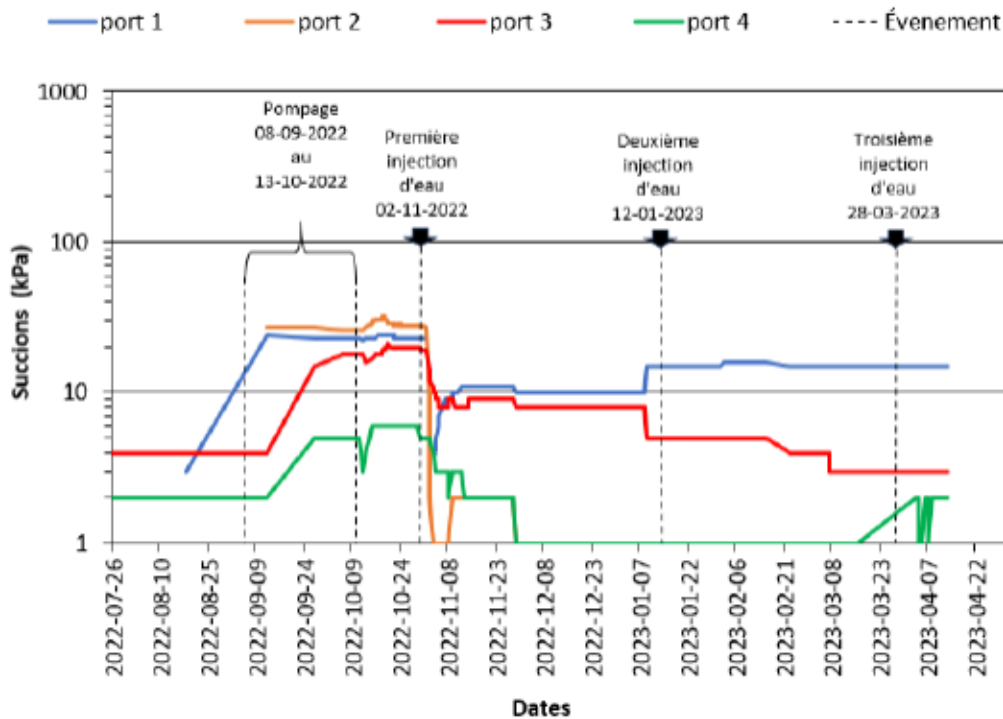


Figure 50 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin

Cette figure montre également que lors du pompage qui s'est étalé du 08 septembre au 13 octobre 2022, une augmentation de la succion a été observée au niveau du port 1, 2, 3 et 4.

Cependant, lors de la première injection d'eau dans les résidus, les succions mesurées au niveau du port 1, 2 3 et 4 ont enregistré une baisse, alors que la deuxième et la troisième injection d'eau dans les résidus, les succions au niveau des port 1, 3 et 4 ont été peu affectées.

Les mesures des teneurs en eau volumiques sont présentées à la Figure 51.

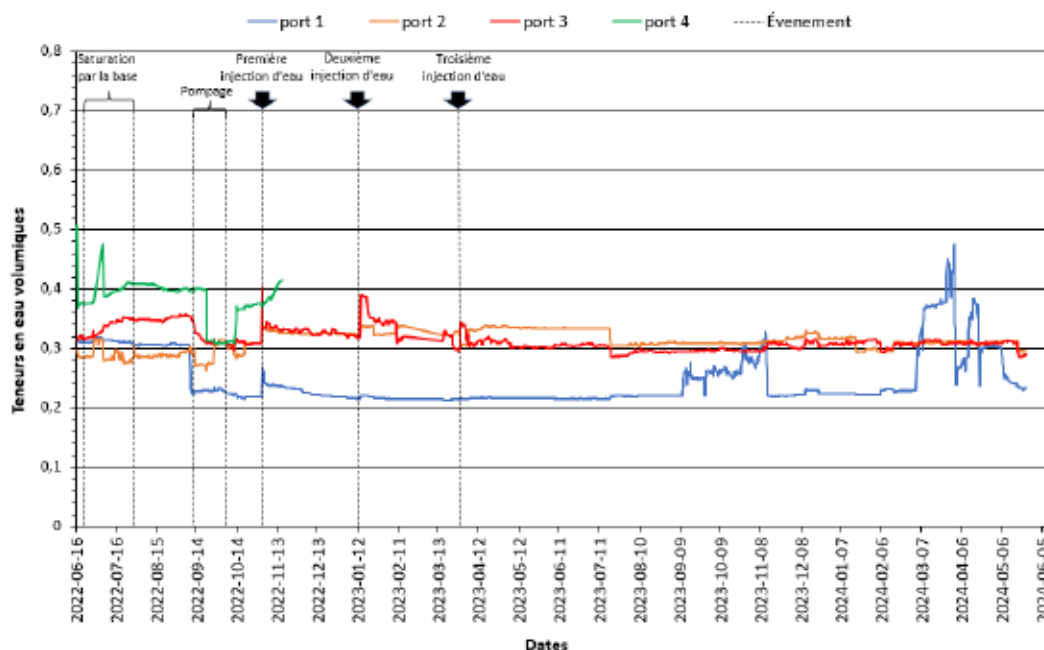


Figure 51 Résultats des teneurs en eau au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin

On peut remarquer que les teneurs en eau volumiques mesurées sont comprises entre 0,308 et 0,507, entre 0,285 et 0,404, entre 0,262 et 0,338 et entre 0,213 et 0,477 respectivement au niveau du port 4, 3 2 et 1.

Au niveau des ports 1, 2 3 et 4, les teneurs en eau volumiques ont connu une baisse ensuite une augmentation au cours de la période de pompage initiée depuis le bas de la colonne et qui s'est étalée du 08 septembre 2022 au 13 octobre 2022.

Au niveau du port 1, les teneurs en eau volumiques élevées ont été mesurées du 18 juin 2022 au 12 septembre 2022 en raison de la saturation par le bas de la colonne. Ensuite une diminution au niveau des teneurs en eau volumiques a été observée en raison des pompages effectués du 08 septembre 2022 au 13 octobre 2022. Cet effet est également observé au niveau port 2, 3 et 4 mais avec un certain décalage.

Un pic notable des teneurs en eau volumiques a été observés le 2 novembre 2022 au niveau des ports 1, 2, 3 et 4, lors de la première injection d'eau dans les résidus.

Cependant après la deuxième et la troisième injection d'eau dans les résidus des pics sont observés seulement au niveau des port 2 et 3 de la colonne.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 5 % de sable limoneux (Colonne 7)

Les succions, mesurées au niveau de la colonne simulant un recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 5 % de sable limoneux sont présentées à la Figure 52.

Les blocs Watermark situés dans les zones supérieures et inférieures (port 4 et port 2) étaient défectueux. La Figure 52 montre que la majorité des mesures effectuées dans l'argile amendée avec 5% de sable limoneux sont demeurées inférieures à l'AEV de cette catégorie de mélange (AEV = 53 kPa). Les succions mesurées dans les résidus miniers étaient comprises entre 2 et 35 kPa, indiquant une désaturation de ces derniers, car la majorité des valeurs de succion enregistrées étaient plus élevées que l'AEV des résidus qui est de 8 kPa.

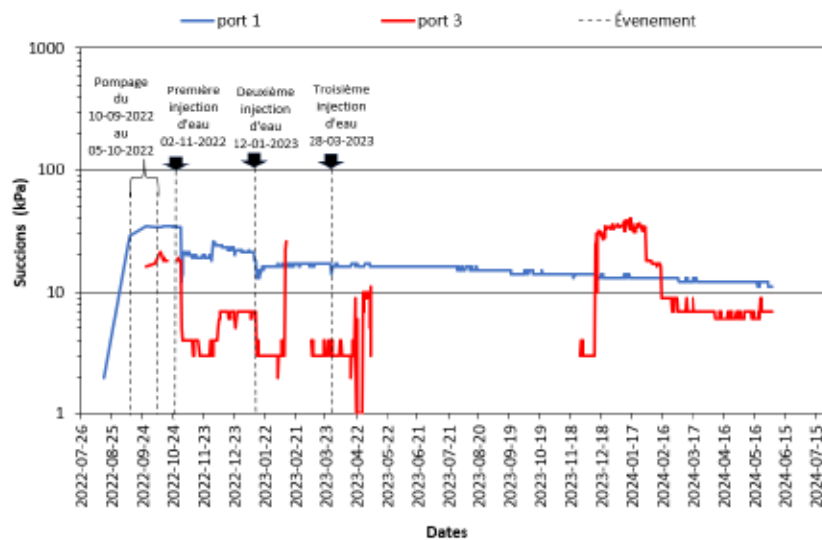


Figure 52 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable limoneux

On remarque qu'au niveau du port 1, les succions ont tendance à augmenter pendant la période de pompage alors que lors des injections d'eau dans les résidus les succions enregistrées au niveau des port 1 et 3 ont tendance à baisser.

Les mesures des teneurs en eau volumiques sont présentées à la Figure 53.

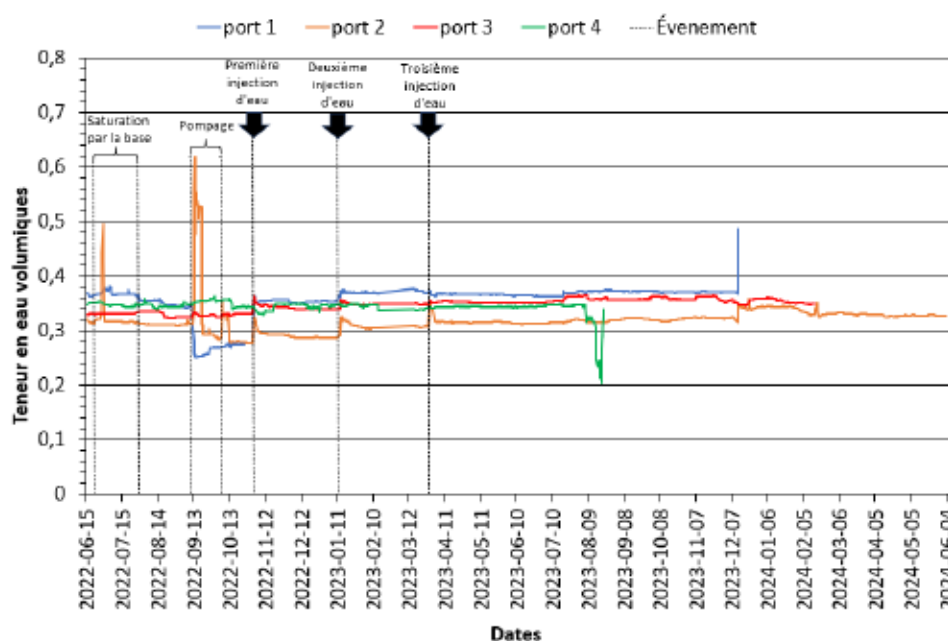


Figure 53 Résultats des teneurs en eau volumiques mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 5% de sable limoneux

Ainsi, les teneurs en eau volumiques mesurées sont comprises entre 0,204 et 0,363, entre 0,323 et 0,365, entre 0,278 et 0,620 et entre 0,252 et 0,487 respectivement au niveau du port 4, 3, 2 et 1.

Au niveau du port 2, on observe un pic au niveau des teneurs en eau volumiques le 29 juillet 2022 lors de la saturation de la colonne par le bas. Également d'autres pics importants au niveau des ports 1, 2 et 3, ont été observés le 2 novembre 2022, 12 janvier et le 28 mars 2023, ces pics sont en relation avec les injections d'eau dans les résidus miniers durant ces périodes. Lors du pompage effectué du 10 septembre au 05 novembre 2022, on observe que les teneurs en eau volumiques ont montré une tendance à la baisse au niveau des port 1 et 2.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 15 % de sable limoneux (Colonne 3)

Il est important de noter que le bloc Watermark installé au niveau des résidus miniers était défectueux durant toute la période des essais et qu'aucun pompage n'a été réalisé au niveau de cette colonne.

Les mesures de succions, effectuées au niveau de la colonne simulant le recouvrement conçu à base d'argile, amendé avec 15% de sable limoneux, sont présentées à la Figure 54. Cette dernière montre que toutes les mesures de succions réalisées au niveau du recouvrement sont restées inférieures à l'AEV de ce mélange (57 kPa), indiquant ainsi, que ce matériel argileux est resté à un haut degré de saturation durant la période d'étude.

Il est important de mentionner que les fluctuations observées sont en étroite relation avec les essais réalisés (mouillage et injection d'eau dans les résidus).

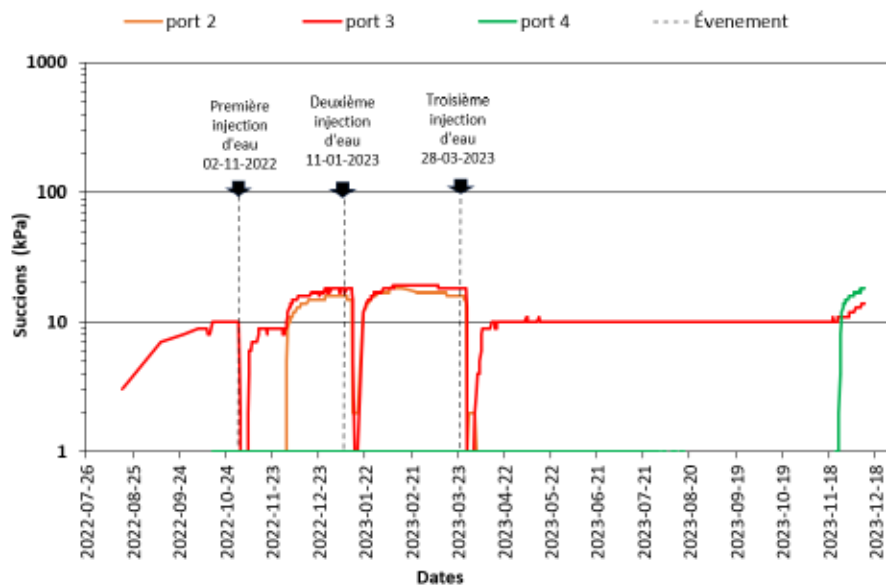


Figure 54 Succions mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable limoneux

Les mesures des teneurs en eau volumiques réalisées au sein de ce recouvrement sont présentées à la Figure 46. Bien que le port 3 situées au niveau de la zone centrale du

recouvrement (plus précisément à 60 cm de la base de la colonne) ne fonctionnait pas, on peut remarquer que dans la zone supérieure du recouvrement (le port 4) les teneurs en eau volumiques mesurées se situent entre 0,276 et 0,398.

Au niveau de la zone inférieure du recouvrement (port 2), les teneurs en eau volumiques mesurées sont comprises entre 0,226 et 0,431. Dans les résidus miniers (port 1) les valeurs de teneur en eau volumétrique variaient entre 0,374 et 0,614. Il est important de mentionner que la teneur en eau volumique la plus élevée a été mesurée juste avant que le capteur ne tombe en panne.

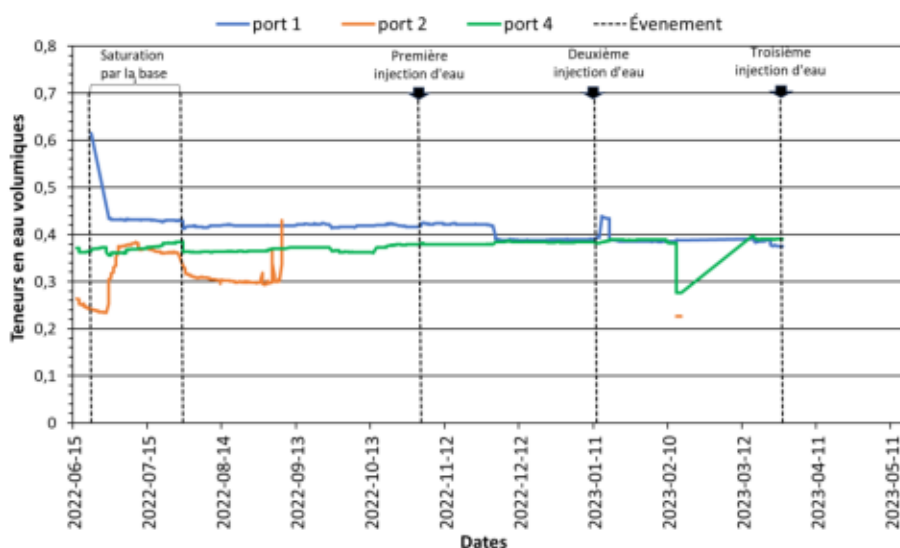


Figure 55 Teneurs en eau volumiques au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 15% de sable limoneux

Au niveau du port 4, les teneurs en eau volumiques mesurées ont montré une certaine stabilité; toutefois, vers la fin de la période de suivi (13 au 15 février 2023), une légère baisse des teneurs en eau volumiques a été observée; ainsi les teneurs en eau volumiques ont diminué de 0,38 à 0,27 durant cette période, avant d'amorcer une augmentation progressive pour atteindre la valeur de 0,39 le 16 mars 2023.

Au niveau du port 1, 2 et 4, les teneurs en eau élevées enregistrées du 22 juin 2022 au 4 juillet 2022 peuvent être attribuées à la saturation de la colonne par le bas pendant cette période.

On observe qu'à chaque injection d'eau les suctions au niveau du ports 2 et 3 diminuent et les teneurs en eau volumiques au niveau des port 1 augmentent alors que la couche supérieure du recouvrement ne semble pas être affectée par les injections d'eau, puisque qu'aucune fluctuation (au niveau des suctions et des teneurs en eau) n'a été observée au niveau du port 4, lors des injections d'eau.

- Recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 25 % de sable limoneux (Colonne 8)

Les mesures de suctions, réalisées au niveau de la colonne simulant le recouvrement conçu à base d'argile amendée avec 25% de sable limoneux sont présentées à la Figure 56. Cette Figure montre que les mesures effectuées dans l'argile amendée restent inférieures à l'AEV de ce matériel et qui est de 60 kPa; ces valeurs indiquent que ce mélange est resté proche de la saturation.

Quant aux suctions mesurées dans les résidus miniers, elles se situaient entre 17 et 40 kPa, indiquant une désaturation de ces derniers, pendant les trois premiers mois de l'essai. Cependant, les valeurs enregistrées dans les résidus, dans la période allant du 13 octobre 2022 au 16 mars 2023 étaient de 0 kPa, indiquent que ces derniers sont potentiellement restés saturés durant cette période (NB : ces valeurs nulles ne sont pas visibles sur le graph à cause de l'échelle logarithmique).

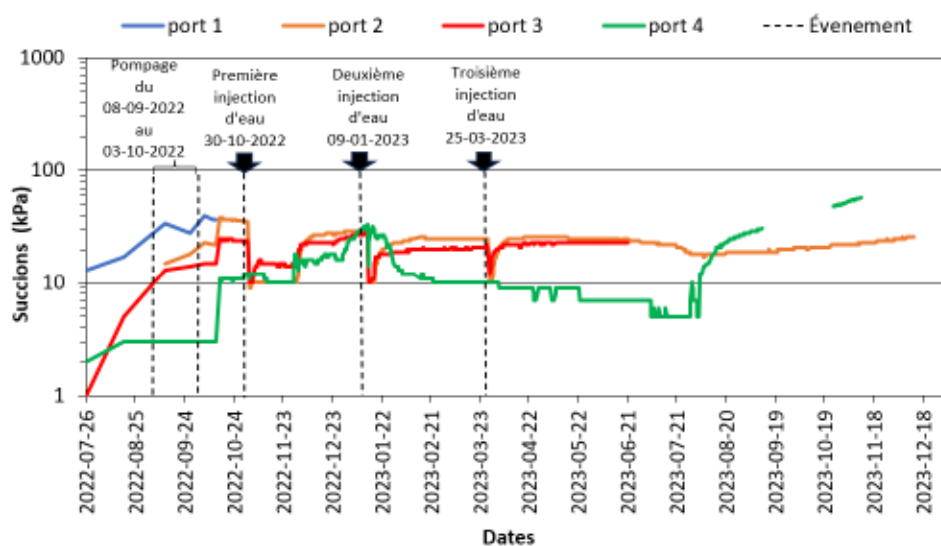


Figure 56 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin

On observe aussi que le pompage a tendance à faire augmenter les succions au niveau des port 1, 2 et 3. De plus à chaque injection d'eau les succions au niveau des port 2 et 3 ont tendance à diminuer.

La Figure 57 montre les teneurs en eau volumiques mesurées au sein du recouvrement conçu avec de l'argile amendée avec 25 % de sable fin.



Figure 57 Teneurs en eau mesurées au niveau de la colonne simulant le recouvrement construit avec de l'argile amendée avec 25% de sable fin

Les teneurs en eau volumiques mesurées sont comprises entre 0,162 et 0,303 et entre 0,100 et 0,261 respectivement au niveau du port 4 et 3.

Les valeurs mesurées dans la zone centrale sont anormalement très faibles et sont complètement en désaccord avec les mesures de succions qui se sont maintenues en bas de l'AEV.

Au niveau de la zone inférieure (port 2), les valeurs mesurées sont comprises entre 0,147 et 0,494. Dans les résidus miniers (port 1), les teneurs en eau volumiques varient entre 0,326 et 0,456.

Lors de la première période de pompage effectué du 16 au 28 juin 2022, on observe que les teneurs en eau volumiques au niveau des port 1, 2, 3 et 4 ont eu une tendance à baisser. Pendant la deuxième période de pompage sur la période allant du 8 septembre au 3 octobre 2022, seuls les teneurs en eau volumiques enregistrées au niveau du port 1 diminuaient.

Par ailleurs, on observe aussi que les teneurs en eau volumiques avaient tendance à augmenter au niveau du port 1, lors des injections d'eau dans les résidus.

- Recouvrement avec deux couches d'argile non amandée (Colonne 4)

Les mesures des succions réalisées dans la colonne simulant un recouvrement multicouche sont présentées à la Figure 58. Cette dernière montre que les succions mesurées dans les matériaux argileux se situaient entre 0 à 12 kPa dans la couche inférieure d'argile (port2) et entre 0 à 80 kPa dans la couche supérieure d'argile (port 4).

Les valeurs de succions, enregistrées dans ces deux couches, sont inférieures à l'AEV de l'argile (150 kPa). Ce qui confirme que ces deux couches argileuses sont restées saturées pendant toute la période d'essai. Alors que, les succions enregistrées dans la couche centrale contenant du sable limoneux variaient entre 0 et 8 kPa.

Ces valeurs sont supérieures à l'AEV du sable limoneux qui est de 2 kPa, ce qui indique une désaturation de cette couche durant la période de l'essai. Par ailleurs, On observe une baisse des succions au niveau du port 3 et une augmentation de ces derniers au niveau du port 4 lors du pompage.

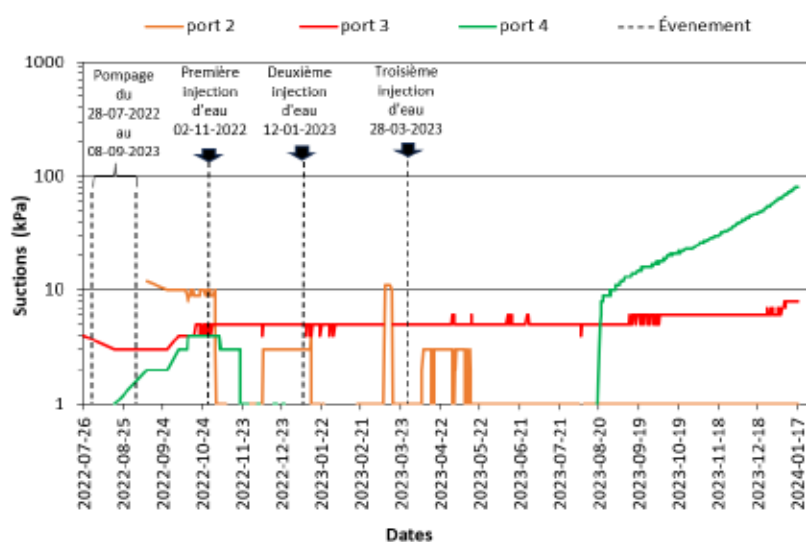


Figure 58 Succions mesurées dans la colonne simulant le recouvrement construit avec deux couches d'argile

Les mesures des teneurs en eau volumétriques réalisées au niveau de ce recouvrement multicouche sont présentées à la Figure 59.

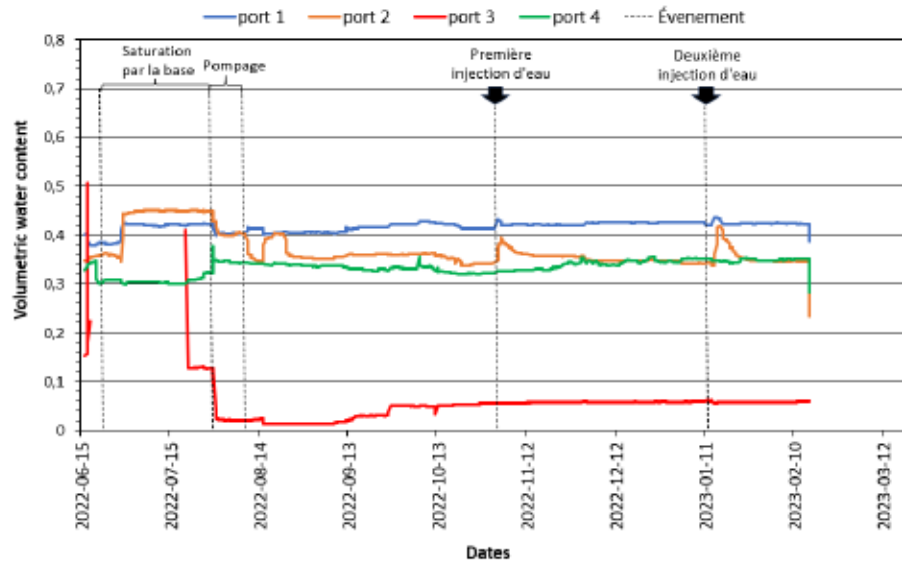


Figure 59 Teneurs en eau volumétriques mesurées au niveau de la colonne composée de deux couches d'argile non amendée

Cette dernière montre que la couche de sable limoneux (port 3) présente une teneur en eau volumétrique plus faible. En revanche, les autres couches présentent des degrés de saturation élevée.

Le pompage effectué du 28 juillet au 8 septembre 2022 semble ne pas avoir affecté les teneurs en eau volumétriques au niveau du port 4. Cependant lors de cette période, une baisse des teneurs en eau volumétriques a été observée au niveau des port 1, 2 et 3.

Par ailleurs, des pics notables de teneurs en eau volumétriques, accompagnées de baisse de succions ont été observés le 2 novembre 2022 et le 12 janvier 2023, au niveau des ports 2 et 1, lors de la première et la deuxième injection d'eau dans les résidus. Cependant lors de la troisième injection d'eau dans les résidus aucune variation n'a été observée au niveau des succions des ports 2, 3 et 4.

4.3 Évaluation des vitesses de percolation

Dans le cadre de notre expérimentation, de l'eau déionisée (eau d'arrosage) a été ajoutée initialement au-dessus de chaque recouvrement et dans chaque colonne, afin de procéder à la saturation des colonnes simulant les différentes configurations de recouvrement. Après différents rinçages il y a eu de l'accumulation d'eau au-dessus des recouvrements des différentes colonnes. Toutefois, après un certain temps on a observé une légère diminution de la colonne d'eau qui s'est maintenu au-dessus des recouvrements à base d'argile (voir Figure 60).

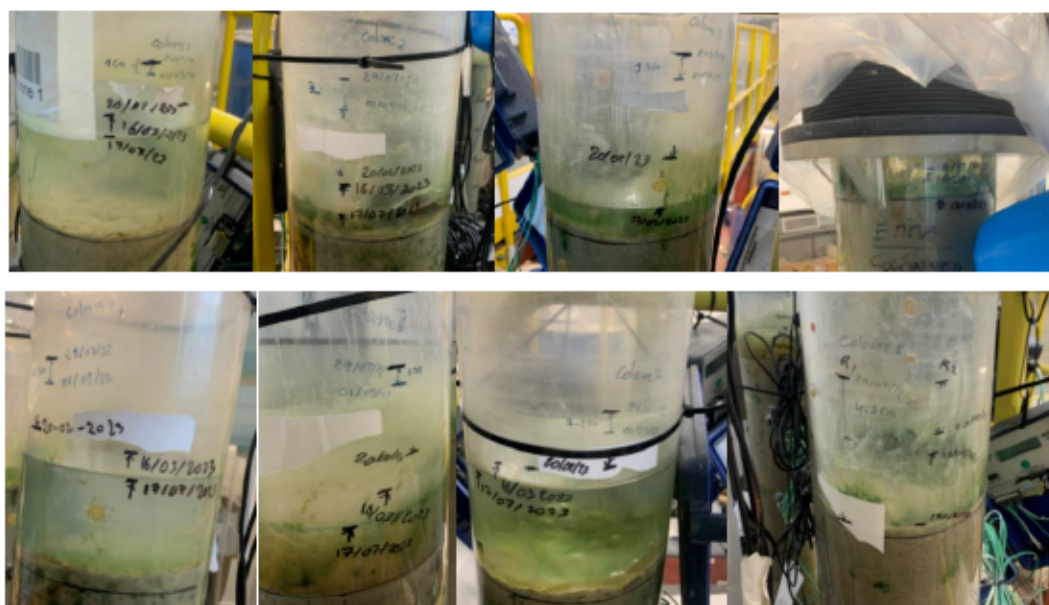


Figure 60 Niveau d'eau au-dessus du recouvrement à base d'argile

Au niveau de ces différents recouvrements, la vitesse d'écoulement à travers le recouvrement a été évalué en utilisant la formule suivante :

$$\text{vitesse d'écoulement} = \frac{\text{Hauteur de l'eau écoulée}}{\text{Période}} \quad \text{Éq. 40}$$

Avec la hauteur en (cm), la période en (secondes) et la vitesse d'écoulement en cm/s (puis converti en m/s). Les valeurs des différents paramètres utilisés dans les calculs ainsi que les résultats obtenus sont présentées au Tableau18 et 19.

Tableau 18 Volumes d'arrosage, volumes d'eau récupérée et volumes d'eau retenu au-dessus des recouvrements durant 325,5 jours d'essais en colonnes de laboratoire

Paramètres mesurés	Volume d'arrosage (cm ³)	Volume d'eau récupérée (cm ³)	Volume d'eau retenu au-dessus des recouvrements (cm ³)
Col 1	2000	815,87	1154,53
Col 2	2000	1693,32	307,88
Col 3	2000	1662,53	369,45
Col 4	1231,50	1231,50	0
Col 5	2000	969,81	939,02
Col 6	2000	1308,47	677,33
Col 7	2000	723,51	1169,93
Col 8	4000	3525,18	76,97

Tableau 19 Hauteurs d'eau écoulée, vitesses d'écoulement obtenues durant 325,5 jours d'essais en colonnes de laboratoire et k_{sat} des matériaux d'intérêt issue des caractérisations

Paramètres mesurés	Hauteur de l'eau écoulée (cm)	Vitesse d'écoulement d'eau (m/s)	k_{sat} du matériau d'intérêt (m/s)
Col 1	5,3	$1,73 \times 10^{-09}$	$2,22 \times 10^{-09}$
Col 2	11	$3,58 \times 10^{-09}$	$3,51 \times 10^{-10}$
Col 3	10,8	$3,52 \times 10^{-09}$	$8,52 \times 10^{-10}$
Col 4	8	$2,61 \times 10^{-09}$	$2,22 \times 10^{-10}$
Col 5	6,3	$2,05 \times 10^{-09}$	$1,86 \times 10^{-10}$
Col 6	8,5	$2,77 \times 10^{-09}$	$1,04 \times 10^{-10}$
Col 7	4,7	$1,53 \times 10^{-09}$	$1,10 \times 10^{-10}$
Col 8	22,9	$7,46 \times 10^{-09}$	$1,39 \times 10^{-10}$

Ainsi les vitesses de percolation calculées se situaient entre $1,73 \times 10^{-9}$ et $7,46 \times 10^{-9}$ cm/s. Il est important de mentionner que ces vitesses ont été obtenues en appliquant une succion à la base des colonnes et de ce fait les vitesses calculées sont largement supérieures aux vitesses réelles d'écoulement. De ce fait on peut conclure que les vitesses d'écoulement d'eau obtenue à l'échelle des colonnes ont des valeurs proches des conductivités hydrauliques saturées, mesurées en laboratoire.

5. CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif du projet de recherche était d'évaluer au laboratoire la capacité des recouvrements à base d'argiles à limiter le flux d'eau d'atteindre les rejets réactifs sous-jacents.

Pour effectuer cette évaluation, 7 mélanges de matériaux à base d'argile de l'Abitibi ont été testés en laboratoire, à travers 9 colonnes expérimentales.

Les principales conclusions qu'on peut tirer de ce travail sont résumées dans les points suivants :

- Les caractérisations au laboratoire des matériaux à base d'argile Abitibienne ont permis de confirmer que ces derniers possèdent les propriétés adéquates, afin d'être utilisés comme couverture de type faible conductivité hydraulique saturée dans des modèles physiques de colonnes en laboratoire.
- Les succions enregistrées au niveau des matériaux de recouvrement étaient inférieures à leur pression d'entrée de l'air permettant de conclure que ces matériaux ont demeuré saturé durant la période des essais.
- Les teneurs en eau élevées et plutôt constantes ont été enregistrées et les recouvrements sont restés saturés durant toute la durée de l'essai, avec de l'eau stagnante qui est restée accumulée au-dessus des recouvrements durant toute la durée des essais.
- Les vitesses de percolation d'eau obtenue à l'échelle des colonnes, ont des valeurs proches des conductivités hydrauliques saturées mesurées en laboratoire qui ont des valeurs adéquates pour constituer des barrières hydrauliques.

En conclusion, le travail réalisé a permis d'atteindre l'objectif initial de recherche, puisque l'étude au laboratoire des scénarios de restauration à base d'argile au moyen de modèles physiques (colonnes instrumentées) a permis de démontrer que les recouvrements à base d'argile maigre Abitibienne ont pu limiter efficacement le flux d'eau vers les résidus.

En sommes, les matériaux à base d'argile de l'Abitibi qui sont des matériaux naturel et disponible dans la région peuvent être amendés avec des sables limoneux ou fin suivant les

configurations telles que proposées dans ce mémoire, afin d'être mis en valeur dans des recouvrements de type faible conductivité hydraulique saturée sur des sites miniers à restaurer.

Bien que les résultats de ce projet de recherche soient prometteurs, il est important de proposer les recommandations suivantes:

- Evaluer l'impact de la position de la nappe sur le comportement hydrogéologique du recouvrement avec l'argile amendée.
- Effectuer des simulations numériques afin de déterminer s'il est possible de réduire les épaisseurs des couches de matériaux à base d'argile dans les différentes configurations proposées afin d'optimiser les coûts de mise en place de ces derniers sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

- Aachib, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2002). Laboratory measurements and predictive equations for gas diffusion coefficient of unsaturated soils. Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical and Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Speciality Conference, Ottawa.
- Aachib, M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156, 163-193.
- Abid, M. G. B. (2012). *Contamination métallique issue des déchets de l'ancien site minier de Jebel Ressas: modélisation des mécanismes de transfert et conception de cartes d'aléa post-mine dans un contexte carbonaté et sous un climat semi-aride. Evaluation du risque pour la santé humaine* Université Paul Sabatier-Toulouse III].
- ACD-o Soil, R. (2006). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. *ASTM International*.
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of cleaner production*, 14(12-13), 1139-1145.
- Albright, W. H., Benson, C. H., Geec, G. W., Roeslerd, A. C., Abichou, T., Apiwantragoonb, P., Lylesa, B. F., & Rockf, S. A. (2004). JEQ Discover'. *J. Environ. Qual*, 33, 2317-2332.
- APHA. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 6). American Public Health Association.
- Arya, L. M., & Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil science society of America journal*, 45(6), 1023-1030.
- ASTM. (2007). D5856-95 (2007). Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, Compaction-Mold Permeameter, ASTM International, ASTM International. In.
- ASTM, D. (1997). 5084-03 (2003) Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. *American Society for Testing of Materials, West Conshohocken*.
- ASTM, D. (2005). D4318-Test Method for Liquid Limit. *Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- ASTM, I. (2016). ASTM D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). *ASTM International*.
- ASTMD2325-68. (1997). Standard test method for capillary-moisture relationship for coarse- and medium-textured soils by porous-plate apparatus (D 2325-68). Annual Book of ASTM Standards, Section 4, . American Society for Testing and Materials (ASTM, West Conshohocken, PA). vol. 04.08. In.
- ASTMD2434. (1997). Test method for permeability of granular soils (constant head). D2434-68 Annual Book of ASTM Standards, Section 4, , vol. 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, , pp. 202-206. In.
- ASTMD6836-16. (2016). Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and/or centrifuge. ASTM D6836-16. ASTM International, West Conshohocken, Pa. doi:10.1520/D6836-16. . In.

- Aubertin, M. (1995). Évaluation en laboratoire des barrières sèches construites à partir de résidus miniers: rapport final.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R., & Crespo, J. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie (Orléans)*(1), 3-14.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers*. Presses Internationales Polytechnique.
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S., Bussière, B., Molson, J., & Chapuis, R. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), 1146-1164.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104-1122.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqsood, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symposium 2015 sur l'environnement et les mines,
- Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 55-69.
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2013). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover. *Mine Water and the Environment*, 32(1), 42.
- Ayadat, T., & Ouali, S. (1999). Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg. *Revue française de géotechnique*(86), 53-56.
- Barton, C., & Karathanasis, A. (2002). Clay Minerals: Encyclopedia of Soil Science. *Rattan Lal, comp., ed. Marcel Dekker: New York, USA*, 187-192.
- Bauters, T. (2015). Possible to achieve zero leaks in geomembrane-lined containment systems using geoelectric leak location surveys. GWRI Geoenvironmental Engineering Symposium, California Polytechnique, San Luis Obispo (aussi communication personnelle),
- Beck, A. (2013). Synopsis of panel discussion on liner integrity surveys. *GeosyntheticsMagazine.com*.
- BENCHOUK, M. B.-O. A. (2005). Comportement des argiles des barrages Sikkak et Boughrara soumis à une pression interstitielle négative.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., & Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals engineering*, 21(4), 330-340.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., & Marion, P. (2000 a). Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International journal of mineral processing*, 60(1), 57-74.
- Benzaazoua, M., Kongolo, M., & Bussière, B. (2000 b). Effect of the granulometry on desulphurization feasibility of mine tailings. *ICARD 2000*, 853-861.

- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., & Bussière, B. (2004). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals engineering*, 17(2), 233-243.
- Blatz, J., & Graham, J. (2000). A system for controlled suction in triaxial tests. *Géotechnique*, 50(4), 465-469.
- Booker, J. R., Brachman, R., Quigley, R., & Rowe, R. K. (2004). *Barrier systems for waste disposal facilities*. Crc Press.
- Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A., & Benzaazoua, M. (2015). Field experimental cells to assess hydrogeological behaviour of store-and-release covers made with phosphate mine waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), 1255-1269.
- Boulanger-Martel, V. (2015). *Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques* [École Polytechnique de Montréal].
- Boulanger, R. W., Meyers, M. W., Mejia, L. H., & Idriss, I. M. (1998). Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta earthquake. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 146-158.
- Brachman, R. (2011). Lessons learned from geomembranes in MSW landfills. CR Symposium.
- Brachman, R., & Gudina, S. (2008). Geomembrane strains from coarse gravel and wrinkles in a GM/GCL composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6), 488-497.
- Brady, N. C. (1990). Soil colloids: their nature and practical significance. *Nature and Properties of Soils*, 177-212.
- Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M., & Gagnon, D. (1999). Modèle d'estimation des coûts de restauration de sites miniers générateurs de DMA. *Séminaire Mines écologiques présentés dans le cadre du congrès APGGQ*.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W., & Chapuis, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Kongolo, M., & Aubertin, M. (2002). Intégration de la désulfuration dans la restauration des sites miniers générateurs de DMA. Proceedings of the Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2020). *Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage*. CRC press.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., & Julien, M. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec. *CIM Bulletin*, 1(6), 1-11.
- Bussière, B., Potvin, R., Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Maqsoud, A., & Cyr, J. (2009). Restauration du site minier Lorraine, Latulipe, Québec: Résultats de 10 ans de suivi. *Environnement, Ingénierie & Développement*.
- Campos-Guereta, I., Dawson, A., & Thom, N. (2021). An alternative continuous form of Arya and Paris model to predict the soil water retention curve of a soil. *Advances in Water Resources*, 154, 103968.
- Chamberlain, E. J. (1981). Frost susceptibility of soil: review of index tests.

- Chapuis, R. P. (2002). The 2000 RM Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 417-439.
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 401-434.
- Chapuis, R. P., Mbonimpa, M., Dagenais, A.-M., & Aubertin, M. (2006). A linear graphical method to predict the effect of compaction on the hydraulic conductivity of clay liners and covers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 93-98.
- Chevé, N. (2019). *Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Cosset, G., & Aubertin, M. (2010). Physical and numerical modelling of a monolayer cover placed on reactive tailings. Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference, Calgary.
- Dagenais, A.-M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires* [École Polytechnique de Montréal].
- Darrouzes, J. (2007). Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) à cellule de collision/réaction (CC/R) pour l'analyse clinique. Performances et applications à l'analyse élémentaire et à la spéciation. *Annales de Toxicologie Analytique*.
- Delage, P., & Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Extrait de la collection, Techniques de l'ingénieur C*, 301, 1-20.
- Demers, I. (2008). *Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide* [Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].
- Demers, I., Benzaazoua, M., Bussière, B., Mbonimpa, M., Fried, E., & Blier, A. (2009). Évaluation de l'application de la gestion intégrée des résidus à la mine Doyon. *Environnement, Ingénierie & Développement*.
- Demers, I., & Pabst, T. (2021). Covers with capillary barrier effects. *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*; Bussière, B., Guittonny, M., Eds.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.-P., Biron, P. M., & Morneau, F. (2014). L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid: l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement* (Volume 8), 67-88.
- Derycke, V., Kongolo, M., Benzaazoua, M., Mallet, M., Barrès, O., De Donato, P., Bussière, B., & Mermillod-Blondin, R. (2013). Surface chemical characterization of different pyrite size fractions for flotation purposes. *International journal of mineral processing*, 118, 1-14.
- Dickinson, S., & Brachman, R. (2008). Assessment of alternative protection layers for a geomembrane-geosynthetic clay liner (GM-GCL) composite liner. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(11), 1594-1610.
- Down, C. G., & Stocks, J. (1977). Environmental impact of mining. *Environmental impact of mining*.

- Dupont, J. (2004). *La problématique des lacs acides au Québec*. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Environnement Québec.
- Elbisy, M. (2006). Prediction of saturated hydraulic conductivity of sandy soil using neural network. *Ain Shams Eng. J. Ain Shams Univ*, 41(1), 480-493.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). An overview of unsaturated soil behaviour. *Geotechnical special publication*, 1-1.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521-532.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Ground water contamination. *Groundwater. Ontario. Canada*, 383-456.
- Gray, N. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental geology*, 30, 62-71.
- Grim, R. (1968). *The clay mineralogy* 2nd edition mac graw hill. *New York*, 596.
- Gudina, S., & Brachman, R. (2006). Physical response of geomembrane wrinkles overlying compacted clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10), 1346-1353.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.
- Hsuan, Y., Schroeder, H., Rowe, K., Müller, W., Greenwood, J., Cazzuffi, D., & Koerner, R. (2008). Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. Proceedings of the 4th European Conference on Geosynthetics, Edinburgh, September. Keynote paper,
- Indrawan, I., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2006). Effects of coarse-grained materials on properties of residual soil. *Engineering Geology*, 82(3), 154-164.
- Julien, M. R., Lemieux, M., Cayouette, J., & Talbot, D. (2004). Performance and monitoring of the Louvicourt mine tailings disposal area. Proceedings of the 36th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Ont,
- Kalin, M., Fyson, A., & Wheeler, W. N. (2006). The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage. *Science of the total environment*, 366(2-3), 395-408.
- Kalonji, A. K. (2014). *Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers* [École Polytechnique de Montréal].
- Kashani, M. H., Ghorbani, M. A., Shahabi, M., Naganna, S. R., & Diop, L. (2020). Multiple AI model integration strategy—application to saturated hydraulic conductivity prediction from easily available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 196, 104449.
- Khouia, A. A. (2018). *Évaluation De La capacité De déviation latérale De La Couche De contrôle Des écoulements D'eau Dans Un modèle Physique Au Laboratoire Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)*].
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics-Vol. 1* (Vol. 1). Xlibris Corporation.
- Komine, H., & Ogata, N. (1994). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 478-490.
- Kongolo, M., Benzaazoua, M., de Donato, P., Drouet, B. t., & Barrès, O. (2004). The comparison between amine thioacetate and amyl xanthate collector performances

- for pyrite flotation and its application to tailings desulphurization. *Minerals engineering*, 17(4), 505-515.
- Lavoie-Deraspe, J. (2019). *Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effets de barrière capillaire sur une halde à stériles de grande dimension*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Lebron, I., Schaap, M., & Suarez, D. (1999). Saturated hydraulic conductivity prediction from microscopic pore geometry measurements and neural network analysis. *Water Resources Research*, 35(10), 3149-3158.
- Leroueil, S., Tavenas, F., & Bihan, J.-P. L. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 681-705.
- Liu, Y., Gates, W. P., & Bouazza, A. (2013). Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 71-80.
- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin, M., Chouteau, M., & Mbonimpa, M. (2011). Field investigation of a suction break designed to control slope-induced desaturation in an oxygen barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), 53-71.
- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2006). Modification of the predictive MK model to integrate hysteresis of the water retention curve. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 2465-2476).
- Maqsood, A., Bussière, B., & Mbonimpa, M. (2021). Low saturated hydraulic conductivity covers. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage; Bussière, B., Guittonny, M., Eds.*
- Maqsood, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2017). Comparison between the predictive modified Kovács Model and a simplified one-point method measurement to estimate the water retention curve. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4), 443-454.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Achib, M., & Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Bussière, B., & Maqsood, A. (2006a). A predictive function for the water retention curve of compressible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132(9), 1121-1132.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Maqsood, A., & Bussière, B. (2006b). Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1121-1132.
- McCarthy, D. F. (1977). *Essentials of soil mechanics and foundations*. Reston Publishing Company Virginia.
- McQuade, S., & Needham, A. (1999). Geomembrane liner defects—causes, frequency and avoidance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 137(4), 203-213.
- Melanson, M. (2006). *Analyse d'un système de traitement passif pour le site de la mine Eustis éditeur non identifié*.
- Ménard, M. (2012). Caractérisation des phases tardives du lac glaciaire Ojibway dans le nord-ouest de l'Abitibi.

- Merdun, H., Çınar, Ö., Meral, R., & Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90(1-2), 108-116.
- Mermillod-Blondin, R. (2005). *Influence des propriétés superficielles de la pyrite sur la rétention de molécules organiques soufrées: application à la désulfuration des résidus miniers*. École Polytechnique de Montréal.
- Mian, M. H., & Yanful, E. K. (2004). Analysis of wind-driven resuspension of metal mine sludge in a tailings pond. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 3(2), 119-135.
- Molson, J., & Frind, E. (2012). On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection. *Journal of Contaminant Hydrology*, 127(1-4), 76-87.
- Moncur, M., Jambor, J., Ptacek, C., & Blowes, D. (2009). Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2362-2373.
- Nfissi, A., Mohamed, S., & Azelmad, S. (2018). eGovernment whole-of-government approach for good governance: initiatives from morocco. *African Journal of Governance and Development*, 7(2), 24-34.
- Ng, C. W., Liu, J., Chen, R., & Coe, J. L. (2015). Numerical parametric study of an alternative three-layer capillary barrier cover system. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4419-4429.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A., & Reardon, E. J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(1), 1-8.
- Nordstrom, D., & Wilde, F. (2005). Reduction-6.5 oxidation potential (electrode method). *US Geological Survey TWRI Book*, 9.
- O'kane, M., Wilson, G., & Barbour, S. (1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), 828-846.
- Olesik, J. W. (1991). Elemental analysis using icp-oes and icp/ms. *Analytical Chemistry*, 63(1), 12A-21A.
- Othman, M. A., Benson, C. H., Chamberlain, E. J., & Zimmie, T. F. (1994). Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw: state-of-the-art. *ASTM Special Technical Publication*, 1142, 227-227.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323.
- Pabst, T., Bussière, B., Aubertin, M., & Molson, J. (2018). Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydro-geochemical assessment. *Journal of Contaminant Hydrology*, 214, 39-53.
- Pabst, T., Molson, J., Aubertin, M., & Bussière, B. (2011). Physical and geochemical transport modelling of pre-oxidised acid-generating tailings with a monolayer cover. *Mine Closure 2011: Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure*,

- Paine, P. (1987). An historic and geographic overview of acid mine drainage. Proceedings of the Acid Mine Drainage Seminar/Workshop, Halifax, NS,
- Pelletier-Allard, R. (2014). *Caractérisation et neutralisation du drainage minier acide par une dolomie à haute pureté* éditeur non identifié].
- Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire* École Polytechnique de Montréal].
- Plante, B., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2012). Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, 114, 57-69.
- Plante, B., Schudel, G., & Benzaazoua, M. (2021). Generation of acid mine drainage. In *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage* (pp. 1-20). CRC Press.
- Rarison, R. F. M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Pouliot, S. (2023). Properties of HDPE geomembrane exhumed 20 years after installation in a mine reclamation cover system. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(1), 1.
- Risken, J. L. (2014). *Development and Use of Moisture-Suction Relationships for Geosynthetic Clay Liners*. California Polytechnic State University.
- Robertson, A. (2011). Top 10 things that can go wrong with plans for mine closure. Proc. Int. Conf. on Mine Closure,
- Robitaille, V., & Tremblay, D. (1997). *Mécanique des sols: théorie et pratique*. Modulo.
- Romero, E., & Vaunat, J. (2000). Retention curves of deformable clays. *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, 91, 106.
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26(10), 2625-2629.
- Rouessac, F., Rouessac, A., & Cruch??, D. (2004). *Analyse chimique*. Dunod.
- Rowe, R. K. (2012). Short-and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(2), 141-169.
- Salager, S. (2007). *Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique* Université Montpellier 2, sciences et techniques du Languedoc].
- Salager, S., Jamin, F., El Youssoufi, M. S., & Saix, C. (2006). Influence de la température sur la courbe de rétention d'eau de milieux poreux. *Comptes Rendus Mécanique*, 334(6), 393-398.
- Sivapullaiah, P., Sridharan, A., & Stalin, V. (1996). Swelling behaviour of soil bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(5), 808-814.
- Skempton, A. (1953). The colloidal activity of clays. *Selected papers on soil mechanics*, 1, 57-61.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2010). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International.
- Tang, A.-M., & Cui, Y.-J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 287-296.

- Tessier, D. (1984). *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux-Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation.*
- Tinjum, J. M., Benson, C. H., & Blotz, L. R. (1997). Soil-water characteristic curves for compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1060-1069.
- Van Damme, H. (2013). La terre, un béton d'argile. *Pour Sci*, 423, 50-57.
- Williams, P. J. (1982). The surface of the earth: an introduction to geotechnical science. (No Title).
- Xi, Y., Frost, R. L., & He, H. (2007). Modification of the surfaces of Wyoming montmorillonite by the cationic surfactants alkyl trimethyl, dialkyl dimethyl, and trialkyl methyl ammonium bromides. *Journal of colloid and interface science*, 305(1), 150-158.
- Yanful, E. K., Riley, M. D., Woysner, M. R., & Duncan, J. (1993). Construction and monitoring of a composite soil cover on an experimental waste-rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 588-599.
- Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, K., & McMullen, J. (2001). Capillary cover design for a spent leach pad.

ANNEXE A –

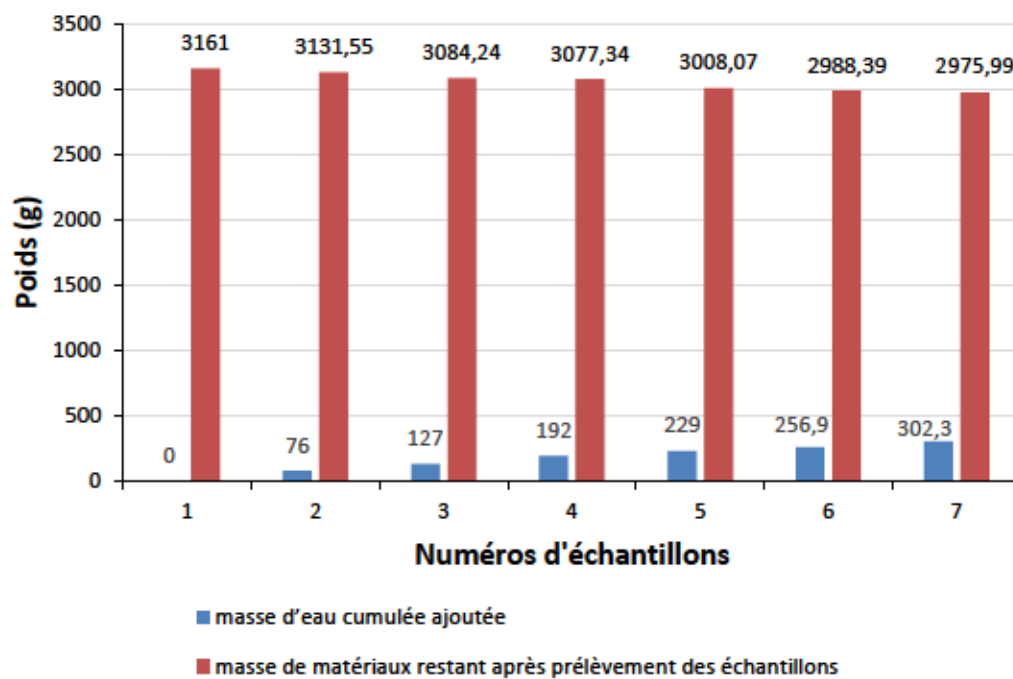


Figure 61 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 2

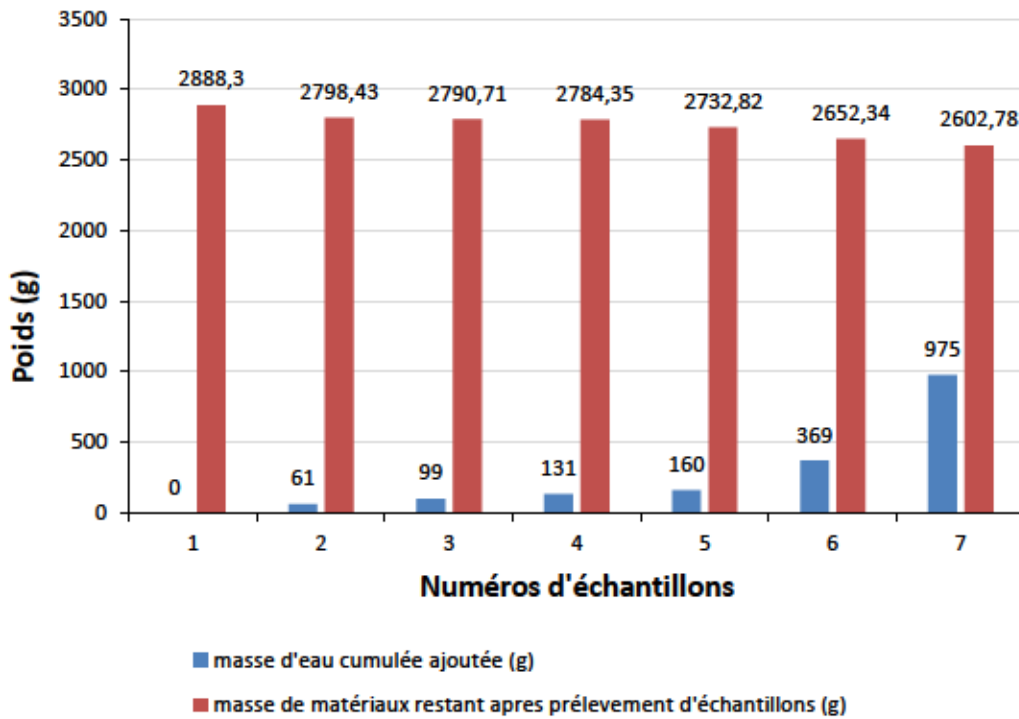


Figure 62 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 3

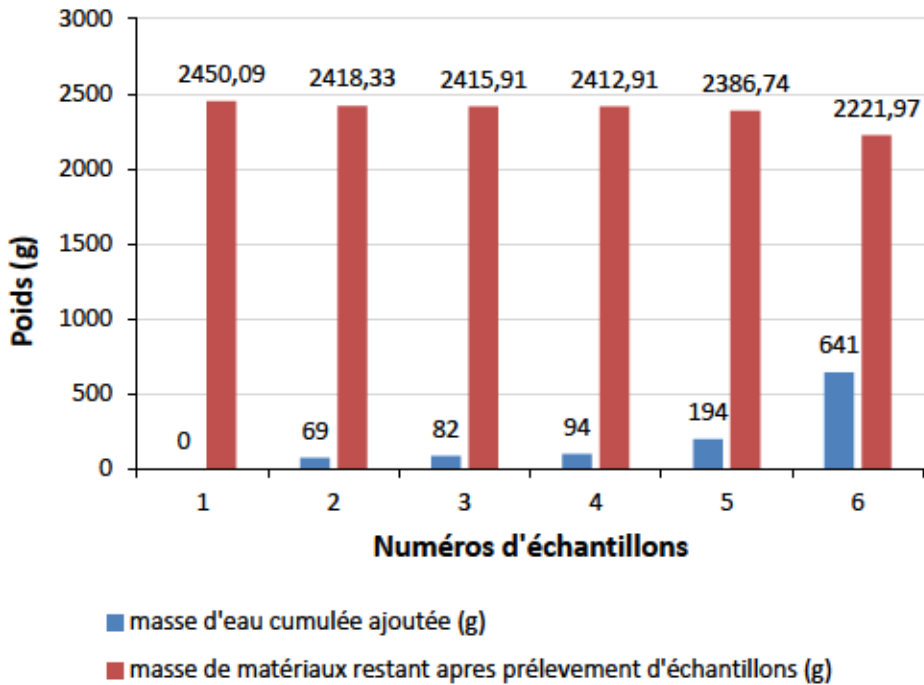


Figure 63 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 4

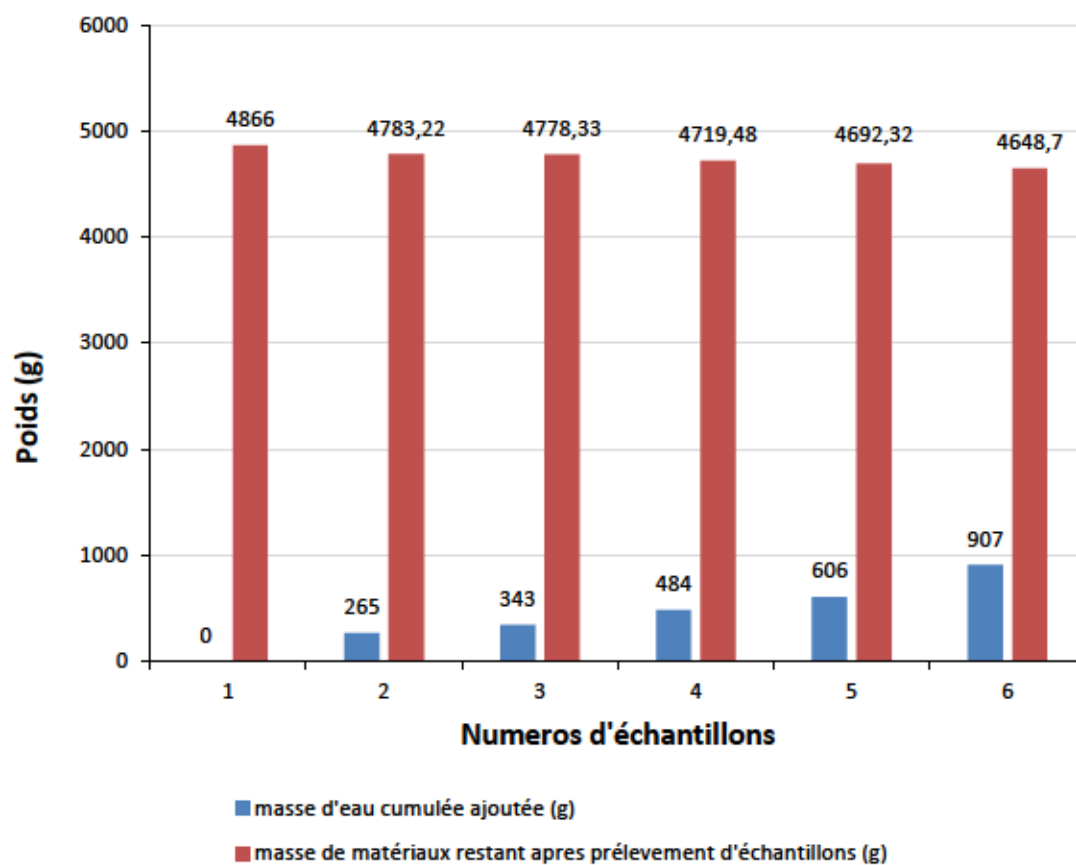


Figure 64 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 5

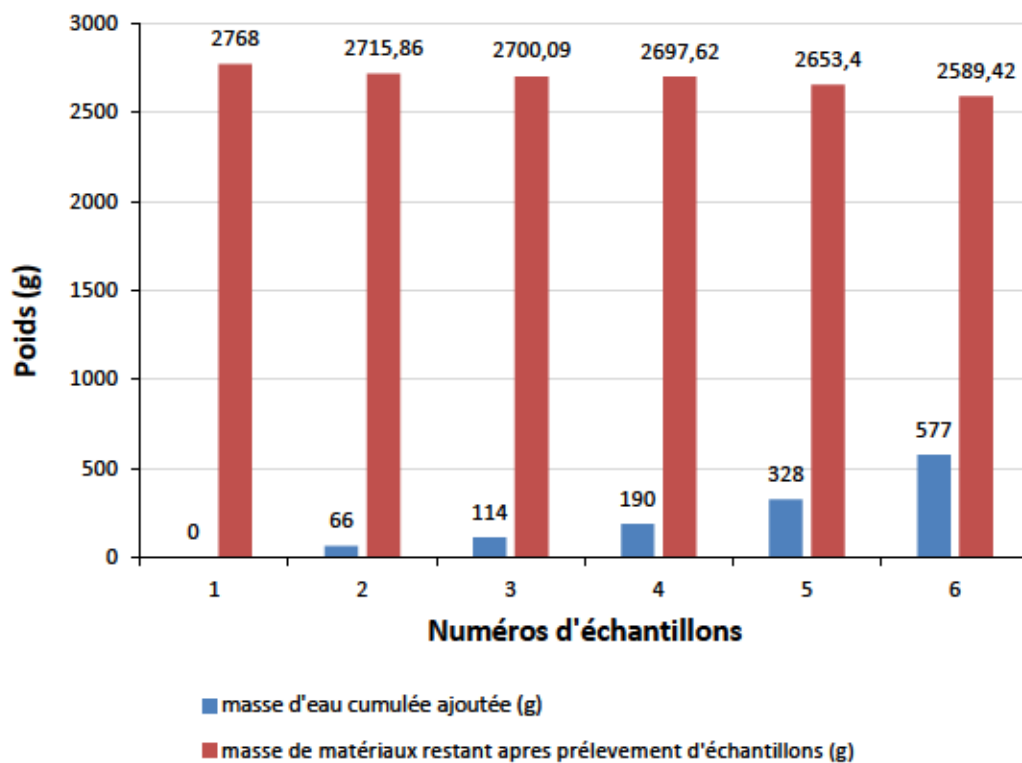


Figure 65 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 6

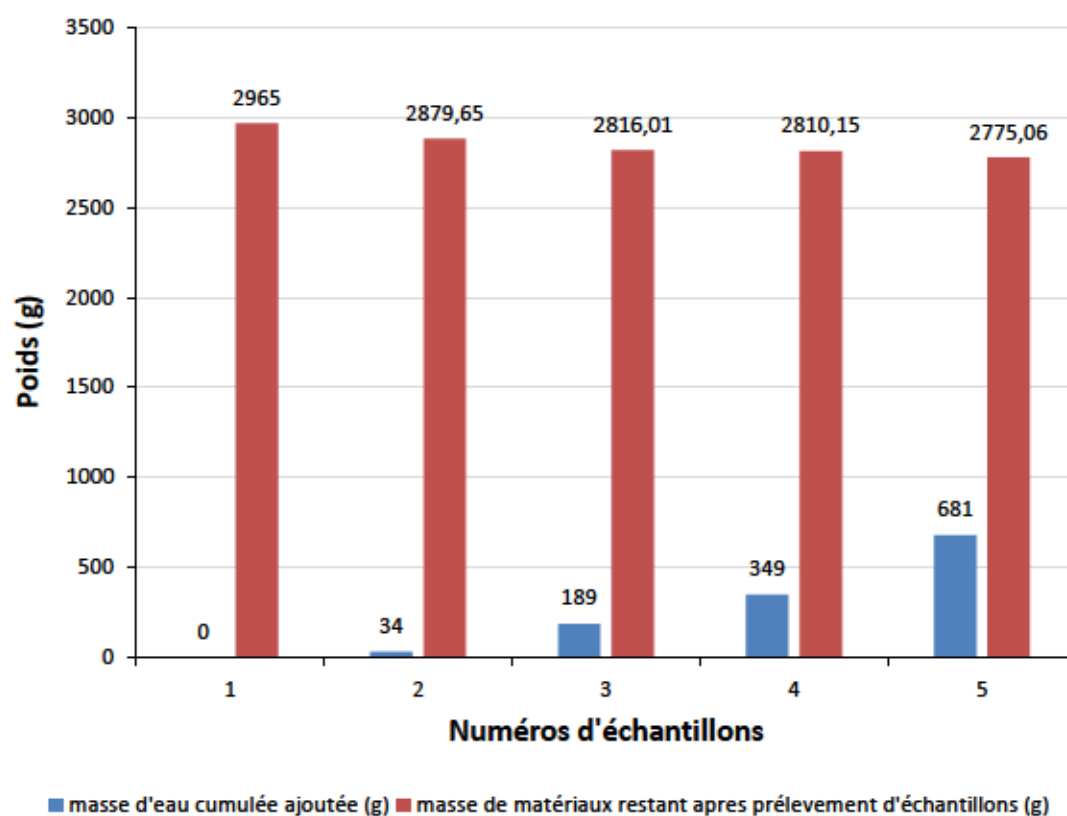


Figure 66 Histogramme comparatif pour le calibrage du mélange 7